

Erfassungsplanung nach dem Optimierungsprinzip am Beispiel des Streifenprojektionsverfahrens

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Holtzhausen

geboren am 28. November 1980 in Sebnitz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Tag der Einreichung: 23. Januar 2015

Tag der Verteidigung: 2. Juni 2015

Für Karlotta, Malik und Henrike

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Professor Ralph Stelzer, der meine Arbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD der Technischen Universität Dresden vertrauensvoll unterstützt und betreut hat. Ebenso möchte ich mich bei Professor Karl-Heinrich Grote für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Ich möchte meiner Kollegin Christine Schöne herzlich danken. Sie hat diese Arbeit immer wieder durch Anregungen, konstruktive Kritik und Zureden motiviert. Auch meinem Kollegen, Stefan Dahlke, danke ich für die fachliche Unterstützung in der Welt der Computergrafik. Aber auch allen anderen Kollegen des Lehrstuhls sei für den starken Zusammenhalt und die aufbauenden Gespräche gedankt.

Meinen Eltern, Lutz und Anette Holtzhausen, danke ich von ganzem Herzen für die nie nachlassende Unterstützung während meines gesamten Bildungsweges.

Meiner lieben Ehefrau Uta danke ich für die moralische Unterstützung und den erfahrenen Rückhalt bei der Entstehung dieses Werkes.

Dresden, im Juni 2015

Stefan Holtzhausen

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Optische Messtechnik in Qualitätssicherung und Reverse Engineering	1
1.3 Stand der Technik	3
1.3.1 Erfassende Verfahren	3
1.3.2 Simulation von Erfassungsverfahren	6
1.3.3 Erfassungsplanung	6
1.4 Motivation und Zielstellung	7
2 Mathematische, physikalische und technische Grundlagen	9
2.1 Triangulationsverfahren	9
2.2 Allgemeine Funktionsweise der aktiven Triangulationsverfahren	12
2.2.1 Triangulationsprinzip	12
2.2.2 Korrespondenzproblem und Codierung	13
2.2.3 Räumlicher Vorwärtsschritt	14
2.3 Optische Abbildung	17
2.3.1 Geometrische Optik	17
2.3.2 Mathematische Beschreibung der Zentralprojektion	19
2.3.3 Scharfabbildung	21
2.3.4 Auflösungsvermögen	23
2.3.5 Bildmaßstab	25
2.4 Abbildungsfehler und Beeinflussungsfaktoren	26
2.5 Abbildungstransformation	28
2.5.1 Transformationskette	29
2.5.2 Abbildungstransformation auf der Grafikkarte	32
2.6 Streifenprojektionsverfahren	33
2.6.1 Codierung	34
2.6.2 Phase-Shift-Verfahren	35
2.6.3 Kalibrierung	36
2.6.4 Konfiguration und Messfeld	37
2.6.5 Mehrbildauswertung	40

2.7	Einflussfaktoren aktiver Triangulation	41
2.7.1	Sensor- und Projektoreigenschaften	41
2.7.2	Fotometrische Eigenschaften von Oberflächen	43
2.7.3	Beleuchtung und Fremdlicht	45
2.7.4	Geometrie	46
2.8	Aufnahme- und Beleuchtungstechnik	48
2.9	Fehlereinflüsse	49
2.10	Zusammenstellung der modellrelevanten Funktionen und Parameter	50
3	Sichtbarkeitsberechnung	53
3.1	Scanner-Modell	53
3.1.1	Positionierung des Sensors	54
3.1.2	Berechnung der Abbildung eines Objektes	57
3.1.3	Konfiguration des Sensors	57
3.2	Werkstückgeometrie	59
3.3	Berechnung der Sichtbarkeit einer Einzelaufnahme	61
3.3.1	Datenrepräsentation und Finite Flächenelemente	62
3.3.2	Codierung finiter Flächenelemente	64
3.3.3	Berücksichtigung der Beleuchtungssituation	65
3.3.4	Einzelner Beobachter	71
3.3.5	Aussage zur Sichtbarkeit einer Einzelaufnahme	72
4	Erfassungsplanung und Optimierung	75
4.1	Erfassungsplanung	75
4.1.1	Ermittlung der Scannerkonfiguration	75
4.1.2	Festlegung der zu erfassenden Objektbereiche	77
4.1.3	Aufstellen eines Erfassungsplanes für die Sichtbarkeitsberechnung	78
4.2	Optimierungsziele	79
4.3	Optimierungsverfahren	80
4.4	Randbedingungen und Startwertbestimmung	83
5	Parametrisierung und Optimierung am Beispiel kolibri Flex 100	87
5.1	Konkrete Scannerkonfiguration kolibri Flex 100	87
5.2	Bestimmung geometrischer Parameter	91
5.3	Bestimmung fotometrischer Parameter	97
5.4	Zusammenfassung der Modellparameterbestimmung	102
5.5	Erfassung und Erfassungsplanung am Beispiel Verdichterschaukel	103
5.5.1	Optimierung	107
5.5.2	Randbedingungen	109
5.5.3	Fitnessfunktion und Umgang mit Randbedingungen	109
5.5.4	Methoden	110

5.5.5	Optimierungsergebnisse Verdichterschaufel	112
5.6	Optimierung am Beispiel eines Halbritzels	116
6	Auswertung und Ausblick	119
6.1	Auswertung	119
6.2	Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	129
A	Anhang	139
A.1	Physikalische Grundlagen: Beugung, Brechung und Reflexion	139
A.2	Einfluss fotometrischer Größen	141
A.3	Bestimmung der Kamera und Projektorposition	142
A.4	Erfassungsergebnisse des Beispielskans	146
A.5	Vergleich rangbasierter zu fitnessproportionaler Selektion evolutionärer Algorithmen	150
A.6	Optimierungsalgorithmen	151
A.7	Modellparameter am Beispiel der Verdichterschaufel	152
A.8	Populationszustände während der Optimierung	153
A.9	Optimierungsbeispiel Halbritzel	154

Symbolverzeichnis

\mathbf{F}'	bildseitiger Brennpunkt
\mathbf{F}	objektseitiger Brennpunkt
\mathbf{H}'	bildseitiger Hauptpunkt
\mathbf{H}	objektseitiger Hauptpunkt
\mathbf{O}	Projektionszentrum der Zentralperspektive
\mathbf{P}'	Bildpunkt
\mathbf{P}	Objektpunkt
a	fokussierte Dingweite
a'	fokussierte Bildweite
c	Kamerakonstante
f	objektseitige Brennweite
f'	bildseitige Brennweite
y	Ortskoordinate
y'	Bildkoordinate
z	Objektabstand
z'	Bildabstand
P_v, P_h	Nah- und Fernpunkt
a_v, a_h	Nah- und Fernpunktdistanz
h	Aufnahmeentfernung, also Abstand Objekt zur Linsenhauptebeneg
h^*	mittlere Aufnahmeentfernung
t	Schärfentiefe
u'	Unschärfekreis
AV	Auflösungsvermögen
D	Durchmesser der Aperaturblende
δ	Beugungsauflösung
k	Blendenzahl
M_b	Bildmaßstab

β'	(lateral) Abbildungsmaßstab
m_b	Bildmaßstabszahl
$I_{u,v}$	Grauwertintensität an der Bildposition u und v
$\delta y'$	Fehler radial-symmetrischer Verzeichnung im Bild
τ bzw. τ'	Einfalls- und Ausfallswinkel des Hauptstrahles in Linsenhauptebene
r	Abstand eines Lichtstrahls zur optischen Achse
Dyn	Dynamikumfang einer Kamera
γ	Abweichung eines Flächenelementes von der Blickrichtung
l_{fin}	Durchschnittliche Größe eines finiten Flächenelementes
$B(\alpha)$	Bildhelligkeit im Winkel α zur Bildmitte (optische Achse)
B_0	Bildhelligkeit in Bildmitte
I	Lichtintensität oder Lichtstärke (allgemein)
α_1, α_r	Einfalls- und Ausfallswinkel
α_{max}	Maximaler Winkel zwischen Fragmentnormale und Blickrichtung, bei dem ein Fragment noch Aufgrund der lateralen Auflösung noch sichtbar ist.
b_i	Binärcodewert am Bit i
c_i	Lichtgeschwindigkeiten im Medium i
g_i	Graycodewert am Bit i
n, n_i	Brechungsindex, bzw. Brechungsindex im Medium i
\mathbf{x}	allgemeine homogene Koordinate
\vec{x}	Richtungsvektor in Form einer homogenen Koordinate
\mathbf{M} und \mathbf{M}_i	Transformationsmatrizen
$\mathbf{P}_{3 \times 1}$	1x3-Untermatrix zur Beschreibung von perspektivischer Projektion
\mathbf{P}_{zp}	Transformationsmatrix zur Punktabbildung
$\mathbf{R}_{3 \times 3}$	3x3-Untermatrix zur Beschreibung von Rotationen, Spiegelungen und Skalierungen
$\mathbf{S}_{1 \times 1}$	1x3-Untermatrix zur Beschreibung von homogener Skalierung
$\mathbf{T}_{1 \times 3}$	1x3-Untermatrix zur Beschreibung von Translationen
$\mathbf{T}^{s \rightarrow g}$	Transformationsmatrix zwischen Scanner- und Weltkoordinatensystem
\mathbf{T}_{Cam}	Transformationsmatrix von Welt in Kamerakoodinatensystem
$d k_d$	Wichtung des diffusen Reflexionsanteils
$s k_s$	Wichtung des glänzenden Reflexionsanteils
R_{diff}	diffuser Reflexionsanteil

R_{spec}	glänzender Reflexionsanteil (specular)
δ	Winkel zwischen Lichteinfalls- und Flächennormalenvektor
\vec{L}	Vektor vom Objektpunkt zur Lichtquelle
\vec{V}	Vektor vom Objektpunkt zum Beobachter
\vec{l}	Lichteinfallsvektor auf Flächenelement
\vec{n}	Flächennormalenvektor auf Flächenelement
I_{ab}	abgestrahlte Lichtstärke
I_{an}	aufgenommene Lichtstärke
λ	Wellenlängenbereich
n	materialabhängige Glanzintensität (Phong-Blinn)
H und W	Bildhöhe und Bildbreite (in Pixel)
N	Anzahl der im Streifenprojektionssensor verbauten Kameras
$\theta_h, \theta_{horizontal}$...	horizontaler Kameraöffnungswinkel
$\theta_v, \theta_{vertikal}$	vertikaler Kameraöffnungswinkel
h_{field}	Messfeldhöhe
\mathbf{cp}	Kameraposition
\vec{cf}	Kamera-Forward Vektor
\vec{cr}	Kamera-Right Vektor
\vec{cu}	Kamera-Up Vektor
A_{ist}	Durch den Erfassungsplan aufgenommener Flächeninhalt des Objektes
A_{soll}	Flächeninhalt der zu erfassenden Oberfläche des Objektes
$EerfP$	Erfassungsplan
d_k	Kleinster Abstand zwischen zwei Drehwinkeln im Erfassungsplan
d_{min}	Mindestabstand zwischen zwei Drehwinkeln im Erfassungsplan
f_{Ind}	Fitnessfunktion eines Erfassungsplanes
n_{gesamt}	Anzahl an Aufnahmen pro Erfassungsplan
n_{oben}	Anzahl an Aufnahmen des Erfassungsplans im oberen Drehkreis
n_{unten}	Anzahl an Aufnahmen des Erfassungsplans im unteren Drehkreis
p	Populationsgröße (Anzahl an Individuen in einer Population)
t_g	Schwellwert zur Binärbildberechnung
t_s	Straffaktor

1 Einleitung

1.1 Einführung

In vielen Bereichen der industriellen Qualitätssicherung werden zum Prüfen von Längen, Winkeln sowie Form- und Lagetoleranzen neben klassischen, größtenteils taktilen bzw. berührenden Messmitteln [DK05] verstärkt Streifenprojektionssensoren eingesetzt. Diese arbeiten berührungslos mittels strukturierter Beleuchtung unterschiedlicher Wellenlängen und ermöglichen das großflächige Erfassen von Bauteiloberflächen mit hinreichender Genauigkeit.

Moderne Sensoren erlauben die Aufnahme von mehreren Millionen Oberflächenpunkten in sehr kurzer Zeit. Dank der hohen Rechenleistung und dem immensen Speicherplatz herkömmlicher Computer ist dabei die Verarbeitung großer Datenmengen und somit eine immer dichtere Beschreibung der Oberflächen möglich. Optische 3D-Digitalisierverfahren ermöglichen nicht nur das indirekte Prüfen einzelner Maße und Formen, vielmehr können durch das Digitalisieren der vollständigen Oberfläche eines Objektes ganze Bauteilgeometrien geprüft und mit einem Sollteil verglichen werden. Selbst die Erfassung von Freiformflächen mit hoher Punktdichte in kurzer Zeit stellt kein Problem mehr dar. Die Aufnahme erfolgt durch das Zusammensetzen einzelner Scanaufnahmen verschiedener Positionen des Sensors. Diese Positionen werden in einem Plan zusammengefasst, welcher größtenteils manuell erstellt wird.

In dieser Arbeit wird der Aufnahmeprozess beim Streifenprojektionsverfahren und die damit verbundene Möglichkeit einer Optimierung von Erfassungspositionen untersucht. Dabei geht es nicht um die Abbildung des Prozesses hinsichtlich der Fehlereinflüsse und der Qualität aufgenommener Messpunkte. Vielmehr wird ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Aufnahmepositionen des Sensors und der daraus resultierenden erfassten Oberfläche eines Objektes hergestellt, untersucht und bewertet.

1.2 Optische Messtechnik in Qualitätssicherung und Reverse Engineering

Immer häufiger finden optische 3D-Digitalisierverfahren im Bereich klassischer Messaufgaben Verwendung. Durch eine Kalibrierung dieser triangulationsbasierter Systeme mittels geeichter bzw. kalibrierter Körper und Platten lässt sich eine Maßverkörperung (siehe [DK05]) bestim-

men, anhand derer Oberflächenpunkte maßstabsgerecht errechnet werden. Durch die Angabe des Messbereichs und der dazugehörigen Messunsicherheit des Messverfahrens können aufgabenspezifische Geometrieprüfungen mithilfe der oberflächenbeschreibenden Daten durchgeführt werden. Aufgrund der Skalierbarkeit der betrachteten optischen Messmethoden sind diese in nahezu allen Bereichen des Maschinenbaus nutzbar. So kommen Streifenprojektionsscanner im Bereich des Strömungsmaschinenbaus [DPG08, Bre00] oder zum Prüfen von Karosserieblechen im Automobilbau [Men09] zum Einsatz. Photogrammetrische Systeme finden bei besonders großen Bauteilen (Schiffsrümpfe und Windräder [BS09]) in der Industrie Verwendung.

Zur Prüfung von freigeformten Bauteilen werden häufig oberflächenerfassende 3D-Messsysteme genutzt. Diese ermöglichen eine dichte, diskrete und je nach verwendetem System eine hinreichend genaue Beschreibung der zu messenden Geometrie. Besonders die hohe Messpunktdichte (bis zu mehreren Millionen Punkten [Via11, Gom12a]) pro Aufnahme gegenüber tastenden oder 1D/2D Laserschnittverfahren (siehe SCHREIBER [Sch11]), bietet hier besondere Vorteile. Ferner kann bei Streifenprojektionssensoren eine genaue Führungsmechanik des Sensors entfallen, wenn einzelne Aufnahmen beispielsweise mittels Passmarken photogrammetrisch zueinander referenziert werden [Rei99].

Roboterunterstützte Messzellen in Kombination mit Streifenprojektionsscannern erlauben die Messung komplexer Geometrien und Bauteile vollständig automatisiert [gom12b]. Des Weiteren wurde in [HSS09] ein programmierbarer Streifenprojektionsscanner [IVB06] zum automatisierten Digitalisieren einer Serie (Stückzahl > 1000) von Verdichterschaukeln eingesetzt. In den genannten Bereichen werden alle Aufnahmepositionen des Sensors durch manuelles Teach-in¹ festgelegt. Dabei ist vor allem die Positionierung des Sensors im Raum, sowie das Know-how des Programmierers für ein qualitatives Messergebnis entscheidend.

Ein aufgenommener, digitaler Datensatz kann bei ausreichender Vollständigkeit der erfassten Oberflächengeometrie als Grundlage einer parametrischen Beschreibung d. h. zur *Flächenrückführung* in ein natives CAD-Format dienen. Dieser Prozess, vom Erfassen eines Objektes, der mathematischen Beschreibung der Oberflächen sowie der Überführung in ein parametrisches Flächen- oder Volumenmodell, wird *Reverse Engineering* genannt. Zusammenfassend wird festgestellt, dass leistungsfähige Scantechnik sowohl für messtechnische Aufgaben als auch zur Digitalisierung der Geometrie eingesetzt werden.

¹Teach-In: englisch für Einlernen. Steht hier im Zusammenhang mit dem Vorgeben diskreter oder kontinuierlicher Positionen eines Roboters oder einer Werkzeugmaschine um eine definierte Mess- oder Digitalisierungsaufgabe zu erfüllen.

1.3 Stand der Technik

Nachfolgend wird der Stand der Technik in den Bereichen der erfassenden Verfahren, der Simulation des Streifenprojektionsverfahrens sowie der Erfassungsplanung aufgeführt.

1.3.1 Erfassende Verfahren

Das Ziel für ein Reverse Engineering und Grundlage zum Prüfen anhand eines Bauteilmodelles ist eine digitale Beschreibung der Bauteilgeometrie. Diese kann, wie eben beschrieben, sowohl optische 3D-Digitalisierverfahren als auch durch eine Vielzahl anderer Verfahren gewonnen werden. Ein exemplarischer Überblick über 3D Digitalisier- bzw. Meßverfahren ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Neben zerstörender Datenerfassung wie z.B. durch schichtweises Abtragen von Material und anschließender Digitalisierung, spielen in der industriellen Qualitätssicherung und beim Reverse Engineering zerstörungsfreie Digitalisierverfahren die größere Rolle.

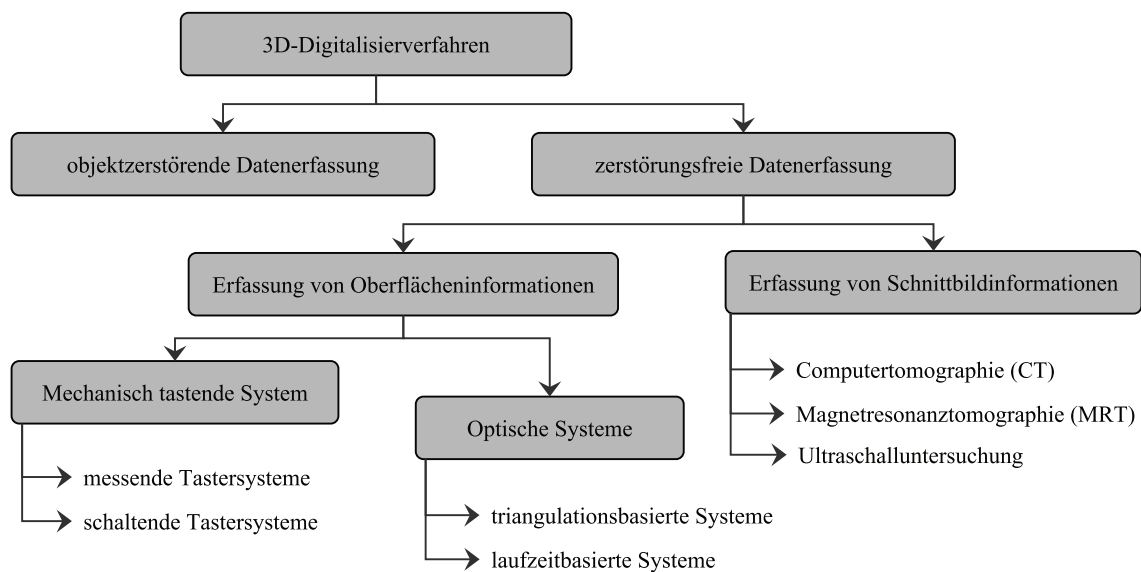
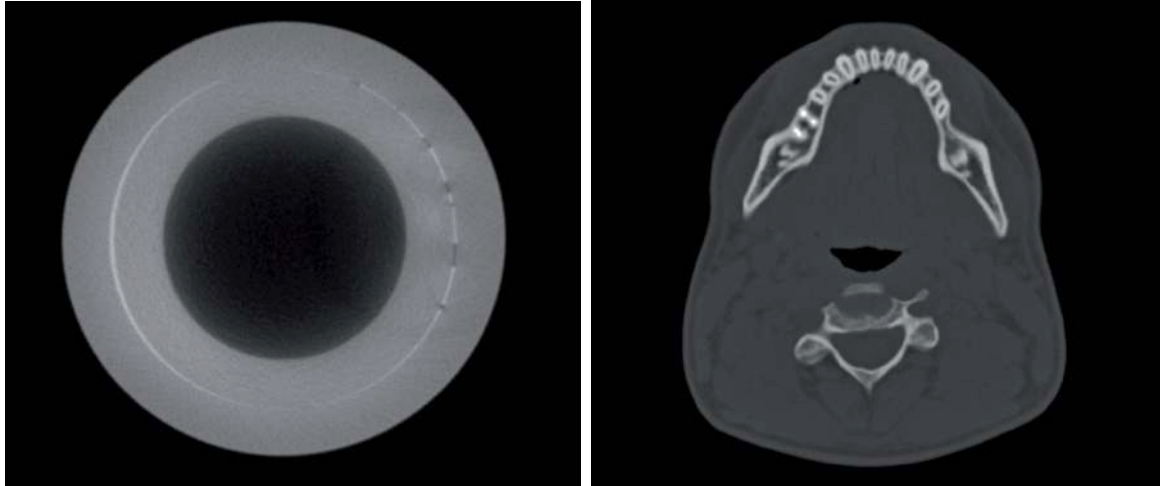


Abb. 1.1: Übersicht über 3D Digitalisierverfahren nach BEYER [Bey02]

Schnittbild- oder volumenerfassende Verfahren wie CT (Computertomographie) oder MRT (Magnetresonanztomographie) ermöglichen die Geometriemodellgewinnung hauptsächlich innerer Strukturen. Diese Verfahren sind neben der klassisch medizinischen Diagnostik in vielen Bereichen der Industrie verbreitet. Hier geht es vorrangig um die Untersuchung von Materialkonsistenzen (Abbildung 1.2a) [HFHS09, WGS07, Yxl12]. Im Bereich der Medizin erlauben CT-Schichtbilder menschlicher Skelettteile (Abbildung 1.2b) eine Geometrierekonstruktion. Daraus resultierend, ist beispielsweise die individuelle Implantatkonstruktion im Bereich des Zahn- und Knochenersatzes [LTD04, Bel06, Fig07] möglich. Mithilfe verschiedener Methoden der Bildverarbeitung und Computergrafik lassen sich aus Schichtbil-

dern durch geeignete Schwellwertbildung Isoflächen extrahieren. Der bekannteste Algorithmus zur Flächengenerierung ist der von LORENSEN und CLINE vorgestellte Marching Cubes [LC87, Sei11].



(a) CT-Bild einer gelöteten Rohrverbindung zur Lun-
kerinspektion (b) Ausschnitt eines menschlichen Kiefers als Grund-
lage zur Geometrierekonstruktion

Abb. 1.2: Beispieldatensätze für verschiedene CT-Anwendungsgebiete [SHS13, DHSS14]

Oberflächenerfassende Systeme lassen sich in taktile und in optische Digitalisierverfahren einteilen. Besonders im klassischen Maschinenbau erfolgt die Maßkontrolle in besonders dafür ausgerüsteten Messlaboren. Hier kommen in der Regel hochpräzise Koordinatenmessmaschinen zum Einsatz, welche einzelne Oberflächenpunkte von Bauteilen mit hinreichender Genauigkeit antasten können [CN06]. Die Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten, spezifische Kenngrößen und deren Prüfung sind durch Regelwerke wie VDI/VDE 2617 1986-2004 festgelegt. Die Anzahl der erreichbaren Messpunkte pro Bauteil bei taktilen Verfahren ist jedoch begrenzt, da das Antasten lange Laufzeiten und einen enormen Einricht- und Programmieraufwand benötigt. Somit sind diese Verfahren zum Digitalisieren großer Flächen oder komplizierter Geometrien nur begrenzt einsetzbar.

Optisch messende 3D-Sensoren arbeiten berührungslos und ermöglichen die Aufnahme von Oberflächenpunkten durch die Verwendung der optischen Eigenschaften von sichtbarem Licht. Nicht optische Verfahren wie Radar oder Ultraschall spielen in der klassischen Mess- bzw. 3D-Erfassungstechnik eine untergeordnete Rolle. Laufzeitbasierte Verfahren nutzen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht oder Lichtbestandteilen in einem lichtdurchlässigen Medium. Dabei ist die Zeit vom Aussenden eines Impulses und dem Empfangen des reflektierten Lichtes proportional zur Entfernung zum beobachteten Objekt. Interferometrische Verfahren bestimmen die Entfernung zu einem Messpunkt durch die Phasenverschiebung von kohärentem Licht zwischen einem Objektstrahl und einem Referenzstrahl in einem Detektor [Kau11, JFJ00]. Nach ZACHER [Zac03] lassen sich optische Digitalisierverfahren alternativ in 1D-Verfahren

(z. B. Laserfokusverfahren), in 2D-Verfahren (z. B. mikroskopische oder Fokussierverfahren) und in 3D-Verfahren (z. B. triangulationsbasierte Verfahren) einteilen.

Für die Digitalisierung von Bauteilen sind triangulationsbasierte und laufzeitbasierte 3D-Erfassungsverfahren entscheidend. Laufzeitverfahren, englisch: *time of flight* - *TOF*, werden häufig für mobile Roboteranwendungen oder, in Kombination mit industrieller Bildverarbeitung, in Bereichen wie Fahrassistenzsysteme genutzt (siehe Abbildung 1.3a). Zur Bestimmung der Flugzeit werden verschiedene Modulationsverfahren (Pulsmodulation, Periodische Modulation oder pseudozufällige Modulation) verwendet [Wio01].



(a) TOF Kamera CamCube von *PMD Technologies*
[Tec12]



(b) ATOS II von *GOM mbH*

Abb. 1.3: Beispiele für optische Digitalisiergeräte kommerzieller Hersteller

Triangulationsbasierte Systeme, insbesondere Verfahren, welche mit strukturierter Beleuchtung (Streifenprojektion) arbeiten, ermöglichen die Aufnahme einer hohen Anzahl an Messpunkten in sehr kurzer Zeit. Ferner können die Sensoren frei im Raum positioniert und orientiert, und somit an die Geometrie eines Objektes angepasst werden. In Kombination mit maschinellen Positioniereinrichtungen (Roboter, Drehteller, etc.) weisen diese Verfahren ein hohes Maß an Automatisierbarkeit auf. Aus der hohen Punktzahl pro Einzelaufnahme, der vielen Freiheitsgrade in der Sensorpositionierung und der Möglichkeit der Automatisierung lässt sich ein hohes Optimierungspotential ableiten!

1.3.2 Simulation von Erfassungsverfahren, speziell Streifenprojektionsverfahren

Im Bereich der Simulation von Streifenprojektionssystemen und anderer optischer Erfassungsverfahren gibt es eine Reihe von Arbeiten. Je nach Entstehungsumfeld weisen diese verschiedenartige Schwerpunkte auf. Besonders ausgeprägt sind Forschungen im Bereich der Messunsicherheitsanalyse solcher Systeme [Böt08, Böt09, HKGR11, SRT11, WHW08]. Dabei spielt die genaue Beschreibung von Unsicherheiten und deren Größenabschätzung eine große Rolle wobei der Erzeugungsweg eines Messpunktes nachempfunden wird.

Für die Berechnung der Teilansichten einer Streifenprojektionsaufnahme sind verschiedene Methoden denkbar. WEICKMANN erarbeitete eine Methode, die schwerpunktmäßig zur Messunsicherheitsanalyse bei einer Messung dient [Wei10]. Dabei wird von diskreten Oberflächenpunkten ausgehend, die Lage zu Projektor und Kamera berechnet. Anhand der Lageinformation eines Punktes als auch der Winkelinformation der Oberflächennormale zum Projektor wird anhand einer Übertragungsfunktion die Phasenintensität bestimmt. Durch Verwendung von Kalibrierdaten, also von Informationen über innere und äußere Orientierung des Kamera-Projektor-Systems, wird anschließend trianguliert und eine Punktkoordinate errechnet. Bei den Teilschritten werden einzelne Messunsicherheiten durch geeignete Verfahren abgebildet und zu einer Gesamtmessunsicherheit des Oberflächenpunktes zusammengefasst. Nachteilig ist, dass bei steigender Anzahl diskreter Punkte auf der Objektoberfläche, durch z. B. detailreiche Beschreibung der Oberflächenelemente, der Rechenaufwand erheblich steigt. Andere Verfahren, wie [LFD13, HXC06] arbeiten ähnlich und haben ihren Fokus auf der Abbildung der erreichbaren Messunsicherheiten. Ferner ist die Unterstützung der simulierenden Verfahren durch Raytracing-Verfahren denkbar [Pen07].

1.3.3 Erfassungsplanung

Die Planung einer Bauteilerfassung mittels eines Assistenzsystems am Beispiel eines Streifenprojektionssystems wurde in der oben bereits erwähnten Arbeit [Wei10] grundlegend erarbeitet. Allerdings ist diese Berechnungsmethode insbesondere bei Verdeckungsrechnungen komplizierter Objekte ineffizient. Ferner ist sie und die dafür notwendigen Parameter auf ein zugeschnittenes Sensorsystem angepasst, was eine Portierung auf andere Systeme erschwert.

Für andere Erfassungssysteme - im Speziellen für den Microsoft-Sensor *Kinect* - existieren Verfahren zum unterstützten Scannen von Geometriepattern [KMHG13]. Hier wird der Nutzer des Systems kontinuierlich über sein Scanergebnis informiert und erhält somit die Chance korrigierend einzuwirken (Stichwort: *Scan-Guide*).

Äquivalente Arbeiten sind auch in anderen Disziplinen zu finden, bei denen geometrische Verdeckungen und Reflexionen zu berücksichtigen sind. Beispielsweise werden im Bereich der Deflektometrie (der Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Flächen) Verfahren genutzt,

um Lichtquellen und Beobachter zu positionieren [LSG13]. Bei Ausleuchtungsproblemen sind ähnliche Fragestellungen denkbar, deren Focus in der optimalen Positionierung von Lichtquellen über definierten Szenen und Objekten liegt. Auch bei speziellen Fertigungsverfahren existieren Problemstellungen, bei denen eine optimale Werkzeugführung aufgrund der Geometrie des Objektes notwendig ist. Hier ist z. B. die Simulation auf Materialauftragsverfahren zu nennen (bspw. Farbauftrag im Bereich Lackierung) [Büc08].

Auch die Anordnungen von Aufnahmepositionen sind für viele Anwendungen entscheidend. Im Bereich der Forschung zum automatisierten Erfassen von unbekannten Objekten gibt es Arbeiten, die sich z. B. mit *Next-Best-View*-Algorithmen beschäftigen [MF98], also Arbeiten, bei denen die nächste notwendige Einzelaufnahme prognostiziert wird, um iterativ ein (unbekanntes) Objekt zu scannen.

1.4 Motivation und Zielstellung

Optische, insbesondere lichtschnitt- bzw. triangulationsbasierte Erfassungsverfahren können in Kombination mit Automatisierungstechnik (z. B. Industrieroboter oder programmierbaren Messmaschinen) zur Stichprobenkontrolle einer Fertigungsserie eingesetzt werden. Dabei werden immer gleiche, bekannte Bauteile erfasst und mittels geeigneter nachgelagerter Auswertung im Sinne der Qualitätssicherung untersucht und bewertet. Grundlage der wiederholenden Messung ist die immer gleiche Abfolge der Positionierung des Sensors, bzw. das gleiche Abtasten des Objektes im Messraum um reproduzierende Ergebnisse zu erhalten. Insbesondere sind hier die Arbeiten von [HSS09, Hei09, HV08] zu nennen.

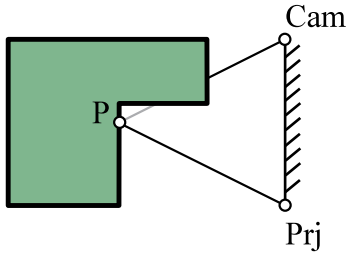
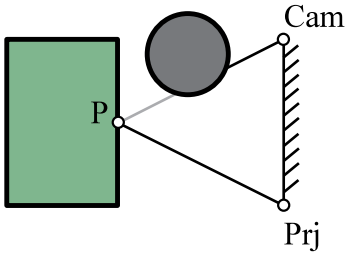
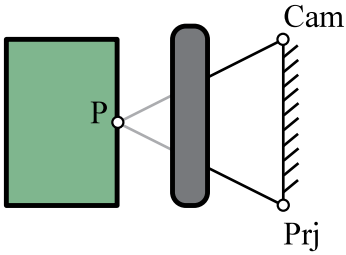
Bei steigender Komplexität des zu prüfenden Bauteils mit der Anforderung nahezu vollständig die Oberfläche zu digitalisieren, wird eine Erfassungsplanung erforderlich. Gemeint ist damit die Planung der Konfiguration sowie die Positionierung und Orientierung von optischen Erfassungssystemen (z.B. Streifenprojektionssensoren), um die geforderten Daten zur Erfüllung der gestellten Messaufgabe zu generieren. Diese Planung ist ebenfalls notwendig, um bei komplizierten Geometrien, zum einen eventuell das Kollidieren des Sensors mit dem Bauteil zu verhindern, zum anderen um bestimmte Aufnahmeperspektiven auf das Objekt zu ermöglichen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine geeignete Modellierung des Digitalisierungsprozesses am Beispiel von Streifenprojektionsscannern, Vorhersagen über das Aufnahmeergebnis in Hinsicht auf die erfasste Oberfläche und der dafür notwendigen Erfassungszeit zu treffen. Zum einen soll durch die vorgeschlagene Methode die Einrichtungszeit während des Erfassungsprozesses verkürzt werden, indem das manuelle Teach-in der Scan-Automaten bezüglich des Digitalisierungsprozesses ersetzt wird. Zum anderen ist eine Erfassungszeitminimierung angestrebt, wobei die erfasste Oberfläche maximiert werden soll.

Zur Berechnung einer erfassten Oberfläche werden einzelne Aufnahmepositionen des Sensors relativ zum Objekt in einem Erfassungsplan zusammengefasst. Dieser wird anschließend berechnet und bewertet. Als Beschreibungsmodell zur Scanergebnissimulation soll dabei eine Methode verwendet werden, die ohne tiefgreifende Systemkenntnis (Bspw. über Datenfilter oder Bildverarbeitungsalgorithmen) für verschiedene Streifenprojektionssensoren anwendbar ist. Der Schwerpunkt wird hierbei nicht auf die Untersuchung von erreichbaren Genauigkeiten und Fehlerquellen der speziellen Sensoren gelegt. Vielmehr wird von kommerziellen Streifenprojektionssensoren und deren Herstellerangaben zu Messfeld, Punktdichte, Wiederholgenauigkeit, etc. ausgegangen.

Bei der Berechnung des Scanergebnisses soll insbesondere die Möglichkeit bestehen, komplexe Verdeckungssituationen aufgrund komplizierter Geometrien der zu erfassenden Objekte sowie durch die Verwendung verschiedener Scanner-Systeme, zu berücksichtigen (Tabelle 1.1). Die notwendige Anpassung von Modellparametern an ein reales Objekt sowie an ein ausgewähltes Scansystem soll betrachtet und am Beispiel verifiziert werden.

Tab. 1.1: Situationen verschiedener geometriebedingter Verdeckung ohne nachfolgender Punktaufnahme. Am Beispiel stellt **Cam** eine Kamera, **Prj** einen Projektor und **P** einen betrachteten Objektpunkt dar.

Selbstverdeckt	Teilweise verdeckt	Komplett verdeckt
 <p>Die Verdeckung eines Objektpunktes P für einen, mehrere oder alle Beobachter (hier Kamera Cam) erfolgt durch das Objekt selbst.</p>	 <p>Der Objektpunkt ist von einem zusätzlichen Objekt für mindestens einen Beobachter verdeckt.</p>	 <p>Der Objektpunkt ist durch ein Objekt vollständig vor den Beobachtern verdeckt.</p>

Durch variieren von Modellparametern soll aufgezeigt werden, ob, und in welcher Form ein Erfassungsplan hinsichtlich der Anzahl an Einzelaufnahmen (indirektes Maß für die Erfassungszeit) und der Vollständigkeit der Daten für nachfolgende Prozesse, optimiert werden kann. Auch hier ist ein Nachweis an einem realen Bauteil von Interesse.

2 Mathematische, physikalische und technische Grundlagen

Grundlagen

Für das zu beschreibende Berechnungsverfahren zur Erfassungssimulation am Beispiel der Streifenprojektion werden im folgenden die notwendigen Grundlagen näher erläutert. Neben der Verfahrenseinordnung, den Grundlagen der triangulationbasierten Verfahren und der optischen Abbildung wird auch die Abbildungstransformation und deren Adaption auf der Grafikkarte beschrieben. Ferner erfolgt eine Beschreibung des Streifenprojektionsverfahrens und der dabei verwendeten Aufnahme- und Beleuchtungstechnik sowie der wichtigsten Einflussfaktoren.

2.1 Triangulationsverfahren

Triangulationsbasierte Verfahren können nach Abbildung 2.1 in *passive* und *aktive* Verfahren eingeteilt werden.

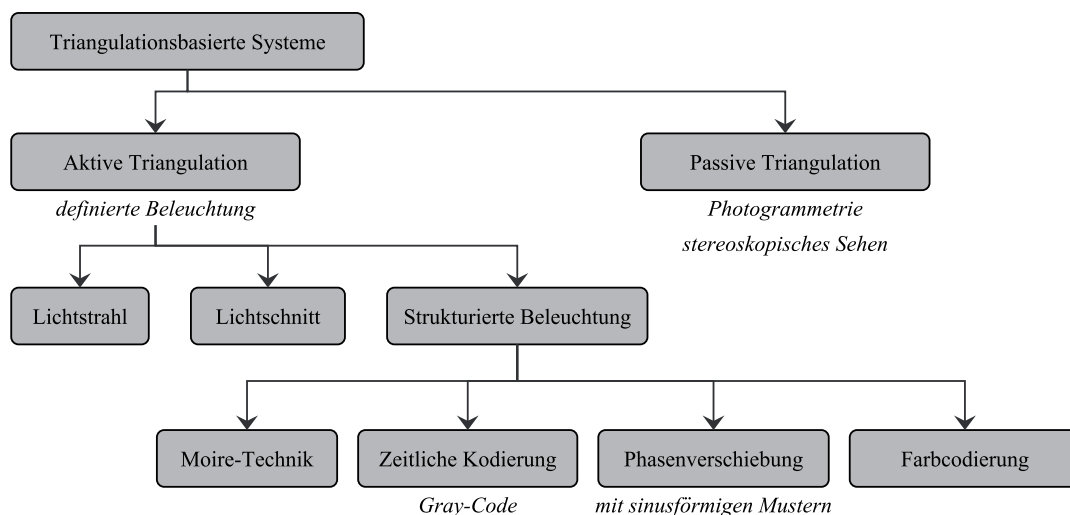


Abb. 2.1: Einteilung der Triangulationsverfahren nach SCHWARTE [SHM00]

Bei der *passiven* Triangulation wird ein Objekt mehrmals mit einer (zeitlich hintereinander) oder mit mehreren Kameras (zeitlich hintereinander oder zeitgleich) aufgenommen ohne da-

bei gezielt Energie (z.B. in Form von projiziertem Licht) in die Aufnahmeszene einzubringen. Die Bestimmung von Werkstückkoordinaten erfolgt im Bild. Dabei müssen Objektmerkmale des Messobjektes eindeutig identifiziert und in mehreren Aufnahmen detektiert werden. Durch Mehrbild-Triangulation (auch Bündelblockausgleichung) können die Raumpositionen der Werkstückkoordinaten anhand der Einzelbildpunkte errechnet werden [Bre93, Luh10b]. In einem System aus zwei Matrixkameras (Abbildung 2.2) wird ein Punkt **C** von beiden Kameras beobachtet. Ausgehend von einer bekannten Orientierung beider Kameras (vgl. Abschnitt *Mathematische Beschreibung der Zentralprojektion*) kann der Punkt anhand beider Bildkoordinaten u_1, v_1 und u_2, v_2 und dem, den Bildpunkt und den Punkt **A** bzw. **B** schneidenden Strahl eindeutig bestimmt werden. Dieser Fall wird auch als *Stereoskopie* bezeichnet.

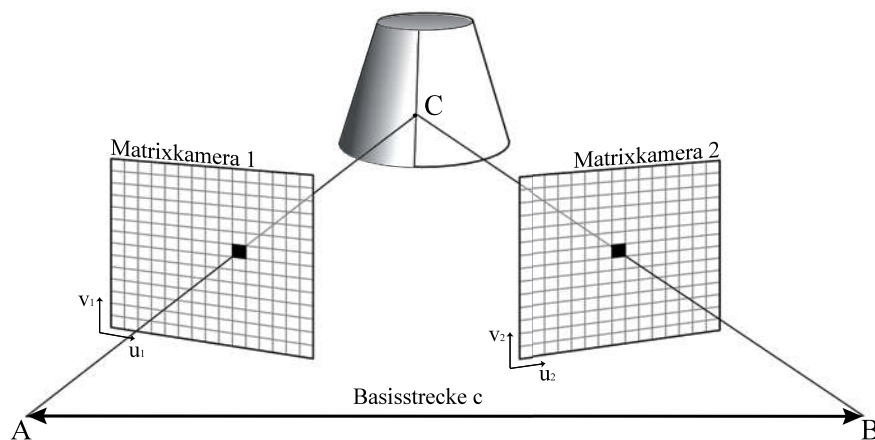


Abb. 2.2: Prinzip der passiven Triangulation. Ein identifizierter Punkt **C** wird von beiden Kameras erkannt. Anhand der Bildkoordinaten kann der Schnittpunkt der Strahlen (Brennpunkt zu Kameramatrix- Durchstoßpunkt)) bestimmt werden [Wio01]

Die Identifizierung des selben Punktes in verschiedenen Bildern kann durch korrelierte Objektmerkmale wie Kanten, Bohrungen oder andere nichtperiodische Elemente erfolgen. Zur Bestimmung einzelner Positionen finden ferner maschinell erkennbare, i. d. R. codierte Marker Verwendung (auch Passmarken genannt). Eine weitere Möglichkeit bietet die Grauwertkorrelation (vgl. [AM97]), bei der objektspezifische Grauwertfolgen von Bild zu Bild identifiziert und zugeordnet werden. Die Erkennung korrelierender Objektpunkte in einer Anzahl von Bildern wird in der Literatur als *Korrespondenzproblem* behandelt [Güh02, Luh10b].

Bei der *aktiven* Triangulation wird der Szene Energie zugeführt. Im einfachsten Fall ist das projiziertes, sichtbares Licht mit welchem Oberflächenpunkte (hier Punkt **C**) beleuchtet werden. Am Beispiel eines Punktlaser-Triangulationssensors ist das Erfassungsprinzip in Abbildung 2.3 abgebildet. Ist die Basisstrecke c und die Ausrichtung des Laser bekannt, lässt sich der Schnittpunkt des Laserstrahles mit dem Objekt, beginnend bei Punkt **A**, mit dem Blickstrahl **B** zu **C** am Durchstoßpunkt der Matrixkamera am Pixel u und v errechnen.

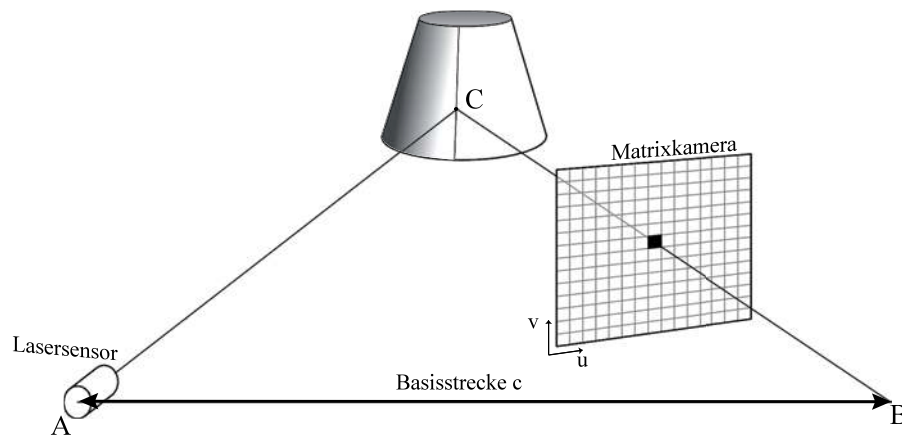


Abb. 2.3: Prinzip der aktiven Triangulation. Ein Laserpunkt wird auf das zu messende Objekt projiziert und von der Matrixkamera erfasst.

Durch die Verwendung spezieller Linsen oder von Linienlasern ist es möglich, statt eines Punktes, Linien auf ein Objekt zu projizieren. Dieses, als *Lichtschnitt* bekannte Verfahren ermöglicht die Aufnahme eines Höhenprofils (Abb. 2.4) mit einer Kamera. Weiterhin ist das Projizieren von speziellen, orts aufgelösten zweidimensionalen Lasermustern denkbar. Dabei kommen leistungsfähige Galvanometerspiegel zum Einsatz, die den Laserstrahl mit bis zu 15 MHz ablenken können [Luh10b]. Durch die, im Vergleich dazu, langsame Aufnahmege-
schwindigkeit der Kamera erscheint im Bild ein kontinuierliches flächenhaftes Muster.

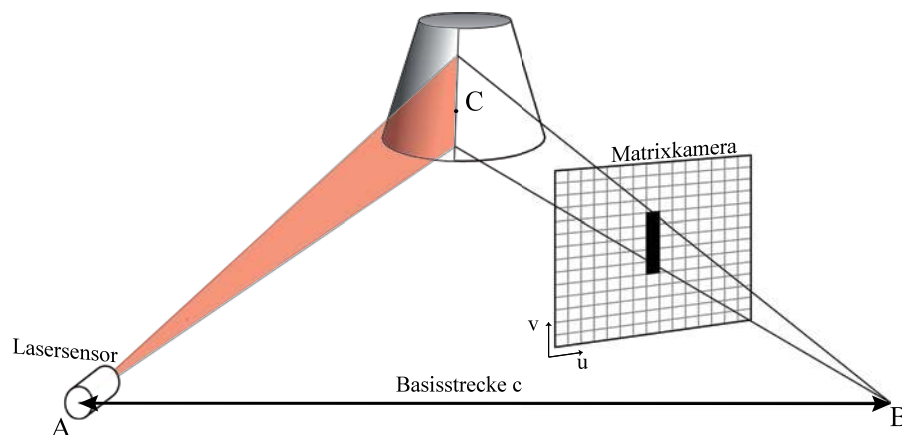


Abb. 2.4: Lichtschnittverfahren - Statt nur eines Punktes wird eine Laserlinie verwendet und durch die Kamera erfasst.

Eine andere Möglichkeit aktiver Triangulationsverfahren ist die Projektion von flächigen Mustern mittels strukturiertem Licht. Dabei werden analoge Diaprojektoren, LCD-Projektoren oder DMD-Projektoren verwendet, um Muster orts- und/oder zeitcodiert zu projizieren [Asw12, Luh10b, Zac03].

2.2 Allgemeine Funktionsweise der aktiven Triangulationsverfahren

Beim Steifenprojektionsverfahren kommen Methoden zum Einsatz, welche für andere aktive Triangulationsverfahren ebenfalls gültig sind. Im Folgenden sind das Triangulationsprinzip, das Korrespondenzproblem und der räumliche Vorwärtsschritt näher erläutert.

2.2.1 Triangulationsprinzip

Bei triangulationsbasierten 3D-Digitalisierverfahren wird bei einer bekannten Basisstrecke c und zwei bekannten anliegenden Winkeln α und β zu einem Bezugspunkt **A** die Entfernung zu einem Punkt **C** bestimmt. Die prinzipiellen geometrischen Beziehungen für den zweidimensionalen Fall sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

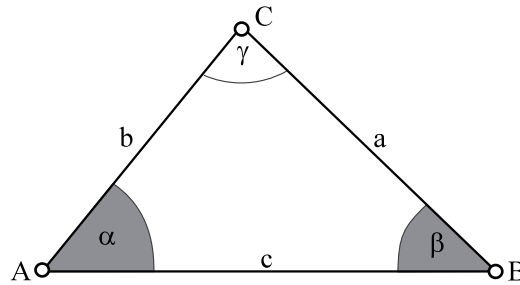


Abb. 2.5: Triangulationsprinzip am Dreieck

Zur Berechnung der unbekannten Position **C** ist der Sinussatz (2.1) sowie der Innenwinkelsatz (2.2) des Dreiecks entscheidend:

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (2.1)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = \pi \quad (2.2)$$

Durch Umstellen der Gleichungen und Einsetzen der gegebenen Größen lässt sich der Abstand b zum Objektpunkt von einem Bezugspunkt (hier **A**) aus bestimmen.

$$\frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (2.3)$$

$$\frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} \quad (2.4)$$

$$b = \frac{c}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} \cdot \sin(\beta) \quad (2.5)$$

2.2.2 Korrespondenzproblem und Codierung

Wie beschrieben, ist die Lösung des Korrespondenzproblems entscheidend für den Einsatz von Triangulationsverfahren. Tatsächlich beschäftigen sich seit Jahrzehnten viele Forschungsarbeiten mit diesem Thema (siehe [Bre93, AM97, Sal98] uvm.). Das Zuordnen von Bildpunkten verschiedener Aufnahmen zu einem Objektpunkt ist für die Triangulation und damit zur 3D-Punktbestimmung entscheidend. Zur Vereinfachung des Korrespondenzproblems kann die Kernstrahl- oder Epipolargeometrie verwendet werden. Dabei spannen die Triangulationsbasis c , welche die direkte Verbindung zwischen den Projektionszentren **A** und **B** zweier Kameras darstellt, sowie der Bildpunkt **C'** eines Objektpunktes **C** in einem Kamerabild eine Ebene auf. Diese Epipolarebene schneidet beide Bildebenen in den Schnittlinien k' und k'' .

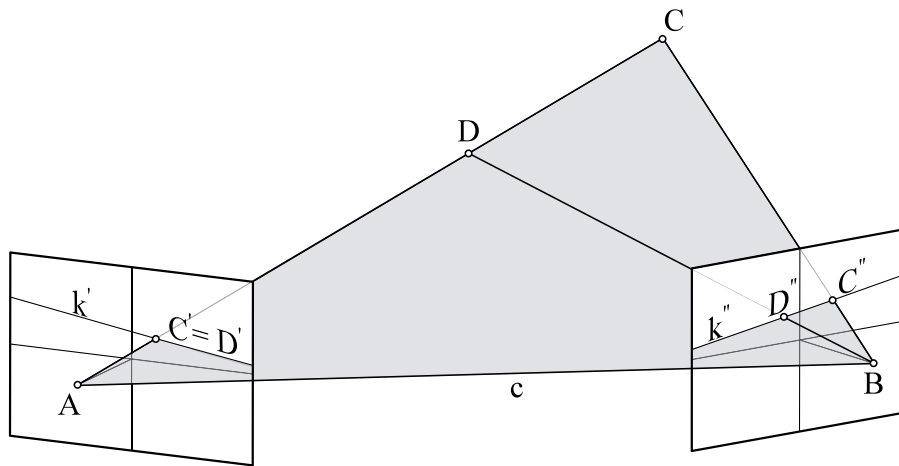


Abb. 2.6: Epipolarebene, aufgespannt durch die Projektionszentren **A** und **B** sowie dem Objektpunkt **C** bzw. Bildpunkt **C'** nach [Luh10b]

Folglich gilt, dass ein Punkt **C'** einen korrelierenden Bildpunkt **C''** besitzt, der auf der Schnittlinie k'' liegen muss. Somit reduziert sich der abzusuchende Bereich eines Bildes erheblich, da nur auf den Schnittlinien nach Korrelationen gesucht werden muss. Ein Punkt **D**, der im linken Kamerabild in Abbildung 2.6 im selben Bildpunkt wie Punkt **C** erscheint ($C'=D'$), wird von einer anderen Beobachterposition (hier die rechte Kamera) als auf der Schnittlinie k'' zum Punkt **C** verschoben wahrgenommen. Diese scheinbare Verschiebung eines Punktes auf einer Schnittlinie wird als Parallaxe bezeichnet.

Eine weitere Vereinfachung zur Korrespondenzfindung ist die Verwendung von codiertem Licht [AAT79, Wah86]. Dabei wird durch einen Projektor eine Folge codierter Muster auf das Objekt projiziert, mit dem Ziel, jedes Kameramatrixpixel eindeutig zu identifizieren. Somit lässt sich für einen Objektpunkt eine eindeutige Zuordnung in den Kameras erreichen. Die einfachste Möglichkeit ist die Projektion eines Linienmusters. Lässt sich in den Beobachtungskameras die Nummerierung der Streifen eindeutig vornehmen, können Punkte eindeutig codiert werden. Jedoch ist die Indexierung der Streifen bei komplexerer Geome-

trie nicht mehr eindeutig, weshalb andere spezielle Codierungsverfahren verwendet werden. Es wird dabei zwischen der Codierung durch eine zeitliche Veränderung des Musters, der Codierung durch eindeutige Nachbarschaftsbeziehungen lokaler Projektionstexturen und der direkten Codierung unterschieden [Sal98, YD, PSa03, PS05, ZCS02].

Zeitcodierte Verfahren projizieren nacheinander verschiedene Muster auf das Objekt. In der Regel sind das binär- oder graycodierte Streifenmuster. Durch ortsinvariante Beobachtung der Objektoberfläche kann einem Bildpixel pro Kamera eine eindeutige Codierung (z. B. hell/-dunkel Wechsel wird zu 0 zu 1 Wechsel) zugeordnet werden, welche für den entsprechenden Objektpunkt in allen beobachtenden Kameras gleich ist. Um subpixelgenau korrelierende Objektpunkte detektieren zu können, werden Verfahren wie Phase-Shift oder Line-Shift verwendet [Güh02].

Die Nachbarschaftscodierung prüft die direkte Umgebung eines Pixels nach Mustermerkmalen, welche eindeutig im Muster definiert sind und nimmt anhand dieser die Identifizierung vor. Dabei ist es aber oft schwierig ein lokales Muster eindeutig zu bestimmen, da komplexe Geometrien oder wenig optisch kooperative Oberflächen (vgl. Abschnitt *Fotometrische Eigenschaften von Oberflächen*, Seite 43) die projizierten Muster nur lückenhaft erkennen lassen. Auch die Codierungsdichte, also die Anzahl der gefundenen korrespondierenden Punkte pro Aufnahme, ist deutlich niedriger als bei zeitcodierten Projektionsverfahren.

Bei der direkten Codierung wird jedem Pixel ein eindeutiger Farb- oder Grauwert zugeordnet. Allerdings sind diese Verfahren bei unterschiedlichen Objektoberflächen oder bei schwieriger Beleuchtungssituation nicht robust genug. Projizierte Farben werden durch texturierte, ungleichmäßig beleuchtete oder farbige Oberflächen unterschiedlich reflektiert bzw. transmittiert¹, was ein eindeutiges Zuordnen der codierten Farbe zu einem beleuchteten Objektpunkt erschwert. Direkte Verfahren sind i. d. R. ungenauer als zeitcodierte, oder nachbarschaftscodierte Verfahren [SPB04].

2.2.3 Räumlicher Vorwärtsschritt

Ist ein Punkt in mindestens zwei verschiedenen Bildern detektiert, erfolgt die Berechnung seiner Position im Raum. Dies erfolgt nach dem *räumlichen Vorwärtsschritt*. In Abbildung 2.8 sind die Projektionszentren **A** und **B** durch die Triangulationsbasis c verbunden und in ihrer Lage (Position, Verdrehung) definiert. Ebenfalls bekannt sind die inneren Orientierungen der Kameras. Die Raumstrahlen \mathbf{r}' und \mathbf{r}'' gehen von ihren Bildpunkten **C'** bzw. **C''** durch die Projektionszentren zum detektierten Objektpunkt **C**. Die Kalibrierabweichung sowie die Detektierungsungenauigkeiten werden dadurch abgebildet, dass sich beide Raumstrahlen nicht genau in einem Punkt treffen. Vielmehr wird die kürzeste Verbindung beider Raum-

¹Transmission ist das Wiederabstrahlen von Wellen von Objekten. Transmission wird auch als *Remission* bezeichnet.

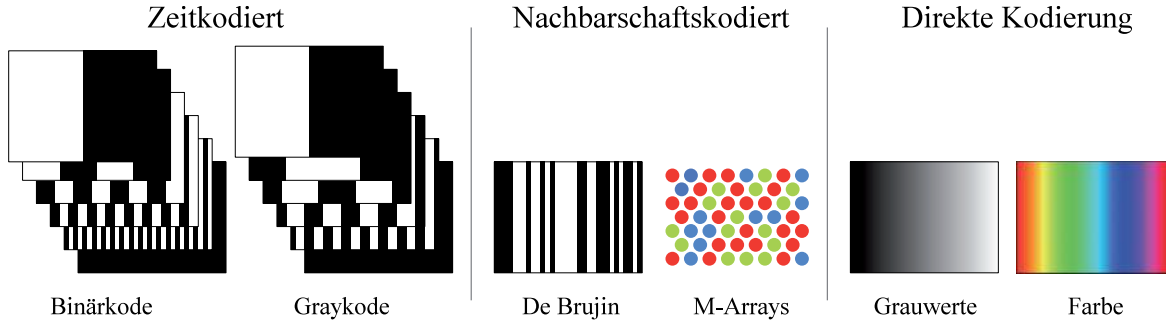


Abb. 2.7: Ausgewählte Codierungsverfahren mittels strukturierter Beleuchtung. Dargestellt sind binäre und gray-code Verfahren als Vertreter der zeitlichen Codierung. De Bruijn Sequenzen und M-Arrays sind nachbarschaftskodierte Verfahren. Die Codierung durch Grauwert- und Farbverläufe sind direkte Codierungsverfahren.

strahlen gesucht. Diese ist durch die Punkte \mathbf{C}_A und \mathbf{C}_B abgebildet, in deren Schwerpunkt der eigentliche Punkt \mathbf{C} liegt.

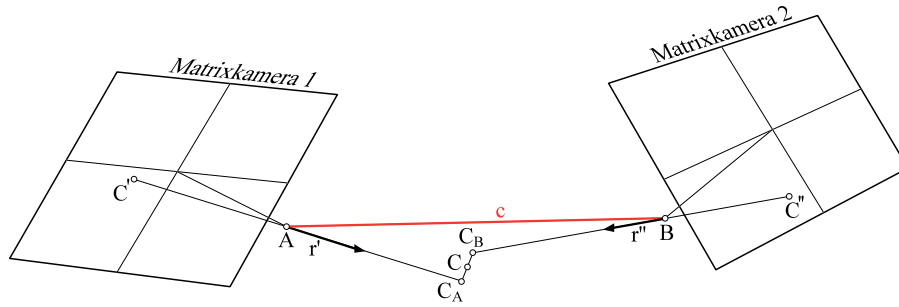


Abb. 2.8: Räumlicher Vorwärtsschritt: Die Punkte \mathbf{A} und \mathbf{B} bilden die Projektionszentren der beiden Matrixkameras, wobei die Kante c die Triangulationsbasis bildet. In beiden Bildern wird der Punkt \mathbf{C} detektiert und mittels Strahlverfolgung der beiden Raumvektoren \mathbf{r}' und \mathbf{r}'' die Position geschätzt.

$$\mathbf{C}_A = \mathbf{A} + \lambda \mathbf{r}' \quad (2.6)$$

$$\mathbf{C}_B = \mathbf{B} + \mu \mathbf{r}'' \quad (2.7)$$

Mit den Geradengleichungen (2.6) und (2.7) und der Bedingung, dass der Vektor $\mathbf{C}_A - \mathbf{C}_B$ orthogonal auf den Hauptstrahlen liegen muss (vergleiche Gleichungen (2.8) und (2.9)), lässt sich ein Gleichungssystem aufstellen, mit welchem die Punkte \mathbf{C}_A und \mathbf{C}_B bestimmt werden.

$$(\mathbf{C}_A - \mathbf{C}_B) \cdot \mathbf{r}' = 0 \quad (2.8)$$

$$(\mathbf{C}_A - \mathbf{C}_B) \cdot \mathbf{r}'' = 0 \quad (2.9)$$

Durch Schwerpunktbildung lässt sich der eigentliche Objektpunkt \mathbf{C} errechnen. Die Angabe der äußeren und inneren Orientierung der Kameras durch die Transformationsmatrizen \mathbf{R}_A und \mathbf{R}_B , sowie der Bildpunkte \mathbf{C}' und \mathbf{C}'' ermöglicht die Berechnung der Hauptstrahlen wie folgt:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{R}_A^{-1} \mathbf{C}' \quad (2.10)$$

$$\mathbf{r}'' = \mathbf{R}_B^{-1} \mathbf{C}'' \quad (2.11)$$

Unter der Annahme, dass die Orientierungswerte einer Kamera vernachlässigbare Unsicherheiten aufweisen, ist für die Punktbestimmung die Messgenauigkeit der Bildpunkte entscheidend. Folglich spielt die Anordnung der Kameras eine entscheidende Rolle. Der Bereich, in dem ein Objektpunkt bei angegebener Bildpunktgenauigkeit liegen kann, beschreibt im Raum einen Ellipsoiden. Die Größe hängt, wie in Abbildung 2.9 skizzenhaft dargestellt, zum einen von der Größe der Bildpunktgenauigkeit sowie dem Bildmaßstab, zum anderen von der Position beider Kameras zum Objektpunkt ab. So tritt bei senkrecht zueinander stehenden Kameras (Abbildung 2.9 - links) ein sehr kleiner Ellipsoid auf. Man spricht von einer guten Schnittgeometrie. Im rechten Bild in Abbildung 2.9 liegen die Kameras nah beieinander. Dies hat zu Folge, dass der Tiefenfehler bei der Punktbestimmung steigt und ein lang gezogener Ellipsoid entsteht. Diese Konstellation wird als schleifende Schnittgeometrie bezeichnet.

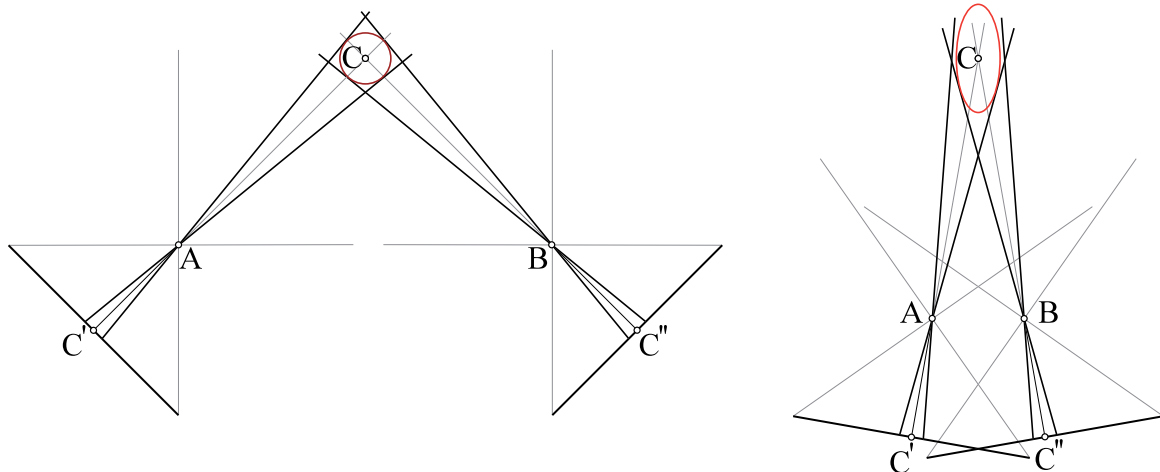


Abb. 2.9: Bei gleicher Bildpunktgenauigkeit und einer Kameradrehung von 90° um den Objektpunkt entsteht eine gute Schnittgeometrie mit einem kleinstmöglichen Fehlerellipsoiden (linkes Bild). Bei flachen Kameraanstellwinkeln entsteht eine schleifende Schnittgeometrie (rechtes Bild) nach [Luh10b].

2.3 Optische Abbildung

2.3.1 Geometrische Optik

Die genannten Kamerasysteme werden i. d. R. mit einem Objektiv genutzt. Dieses besteht aus lichtbündelbegrenzenden Blenden und einer Vielzahl von fixierten und beweglichen Linsen mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften. Die Abbildung eines Objektpunktes \mathbf{P} auf seinen Bildpunkt \mathbf{P}' soll nach der *Gauß'schen Optik* erfolgen. Der Lichteinfall erfolgt dabei achsen-nah und annähernd parallel zur optische Achse der Linse [DMG12, DIN03]. Das geometrische Modell der optischen Abbildung ist in 2.10 dargestellt.

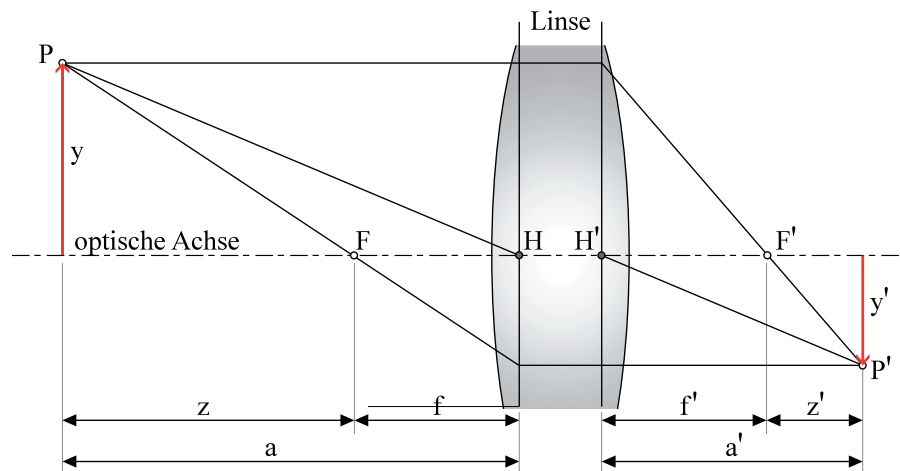


Abb. 2.10: Optische Abbildung für dünne Linsen nach DIN 1335 [DIN03]

Mit:

\mathbf{P}, \mathbf{P}'

Objekt- und Bildpunkt

\mathbf{F}, \mathbf{F}'

objekt- und bildseitiger Brennpunkt

\mathbf{H}, \mathbf{H}'

objekt- und bildseitiger Hauptpunkt

Strecke $\overline{\mathbf{PH}}$ bzw. $\overline{\mathbf{H}'\mathbf{P}'}$

Hauptstrahl

Strecke $\overline{\mathbf{PF}}$ bzw. $\overline{\mathbf{P}'\mathbf{F}'}$

Brennstrahl

a und a'

fokussierte Ding- bzw. Bildweite

f und f'

ding- bzw. bildseitige Brennweite

z und z'

Objekt- und Bildabstand

Ebene durch \mathbf{H} bzw. \mathbf{H}' und senkrecht zur optische Achse

objekt- und bildseitige Hauptebene

Aus dem Verhältnis von Bildgröße y' zu Objektgröße y ergibt sich der (laterale) Abbildungsmaßstab β' bzw. die Bildmaßstabszahl m_b wie folgt:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = 1 : m_b \quad (2.12)$$

Des Weiteren lässt sich die Linsengleichung anhand der Abbildungsverhältnisse zwischen Dingweite a , Bildweite a' und bildseitiger Brennweite f' nachfolgend beschreiben:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (2.13)$$

wobei gilt: $|f| = |f'|$

Ist das Aufnahmeobjekt unendlich weit vom Kamerasystem entfernt, also $a \rightarrow \infty$ gilt: $a' = f'$. Des Weiteren entspricht die fokussierte Bildweite a' in etwa der, in der Photogrammetrie verwendeten Kamerakonstante c .

2.3.2 Mathematische Beschreibung der Zentralprojektion

Das eben erläuterte Modell eines optischen Systems kann zu einer mathematischen Beschreibung der *Zentralperspektive* zusammengefasst werden. Dabei wird die Abbildung eines Objektes in einer Bildebene beschrieben. Ähnlich wie bei einer Lochkamera liegt das Projektionszentrum im Hauptpunkt der Linse. Der Abstand zur Bildebene wird mit der Kamerakonstante c beschrieben.

Zur Formulierung sollen homogene Koordinaten im dreidimensionalen Raum verwendet werden. Diese Form der Beschreibung ermöglicht eine einfache Berechnung von Koordinatentransformationen und Projektionen. Im räumlichen Fall (Dimension $n = 3$) wird eine Dimension zusätzlich (Dimension $n = 3 + 1$) zur Beschreibung eines Punktes verwendet:

$$\mathbf{x}_h = \begin{pmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \\ w \end{pmatrix} \quad \text{allgemeine homogene Koordinate } \mathbf{x} \quad (2.14)$$

Für einen Punkt in kartesischen Koordinaten gilt bei $w = 1$ Gleichung:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_h/w \\ y_h/w \\ z_h/w \\ w/w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.15)$$

während für eine Richtung im kartesischen Raum $w = 0$ gilt. Am Beispiel (2.16) ist der Richtungsvektor $\vec{\mathbf{x}}$ ausgehend vom Ursprung zum Punkt \mathbf{x} beschrieben.

$$\vec{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Die in (2.14) eingeführten homogenen Koordinaten lassen sich mit (4×4) -Matrizen multiplizieren, wodurch sowohl Transformationen wie Translationen, Rotationen, Scherungen und Skalierungen, als auch perspektivische Projektionen mathematisch abgebildet werden.

Gleichung (2.17) zeigt die Basistransformation eines Punktes \mathbf{x}_1 zu \mathbf{x}_2 mit der Transformationsmatrix \mathbf{M} :

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}_1 \quad (2.17)$$

Der Aufbau einer solchen Transformationsmatrix (2.18) besteht aus Untermatrizen die mit $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ Rotationen, Spiegelungen und Skalierungen, mit $\mathbf{T}_{1 \times 3}$ Translationen (Verschiebungen), mit $\mathbf{P}_{3 \times 1}$ perspektivische Transformation und mit $\mathbf{S}_{1 \times 1}$ homogene Skalierungen beschreiben.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{1 \times 3} \\ \hline \mathbf{P}_{3 \times 1} & \mathbf{S}_{1 \times 1} \end{array} \right] \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \text{Rotation} \\ \mathbf{T}_{1 \times 3} & \text{Translation} \\ \mathbf{P}_{3 \times 1} & \text{Perspektive} \\ \mathbf{S}_{1 \times 1} & \text{homogene Skalierung} \end{array} \quad (2.18)$$

Der Vorteil ist die einfache Bildung von Transformationsketten durch Multiplizierung einzelner Transformationsmatrizen \mathbf{M}_i zu einer Matrix \mathbf{M} sowie die Umkehr einer Transformation durch Bildung der inversen Matrix².

Zur Transformation (vgl. [Luh10b, HZ04]) der Objektpunktcoordinate \mathbf{x} in seine Bildcoordinate \mathbf{x}' wird die Transformationsmatrix \mathbf{P}_{zp} benötigt.

$$\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P}_{zp} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{P}_{zp} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Diese setzt sich aus der sog. Kalibrierungsmatrix \mathbf{K} und der Position der Kamera, bestehend aus der Rotation \mathbf{R} und der Lage des Projektionszentrums \mathbf{t} zusammen:

$$\mathbf{P}_{zp} = \mathbf{K} \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{R} & -\mathbf{t} \end{array} \right] \quad (2.20)$$

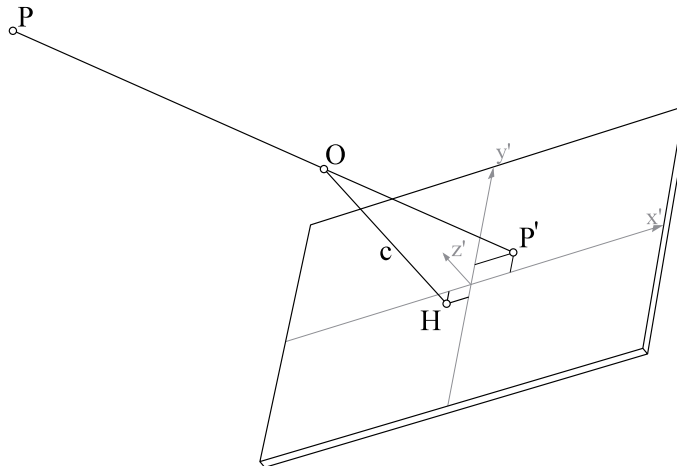


Abb. 2.11: Innere Orientierung einer Kamera (ohne Berücksichtigung der Verzeichnung)

²Diese Eigenschaft ist hauptsächlich in der Robotik und Computergrafik von Bedeutung.

In Abbildung 2.11 ist ein Objektpunkt \mathbf{P} , die Lage des Projektionszentrums \mathbf{O} über der Bildebene der Kamera, sowie die Lage des Bildkoordinatensystems dargestellt. Der Bildhauptpunkt \mathbf{H} ist in der Praxis nicht exakt im Zentrum des Bildes, sondern um x_0 und y_0 verschoben. Mit der Angabe der Lage des Projektionszentrums zum Bildkoordinatensystem $(x'_0, y'_0, c)^T$, einem Scherungsfaktor s' sowie einem achsspezifischen Maßstabsfaktor m_x und m_y beschreibt die Matrix \mathbf{K} die sogenannte *innere Orientierung* der Kamera (2.21).

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} m_x & s' & x'_0 \\ 0 & m_y & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x \cdot c & s' & x'_0 \\ 0 & m_y \cdot c & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Mit Annahme einer 3x3-Rotationsmatrix \mathbf{R} kann die vollständige Transformation wie folgt beschrieben werden. Die Transformation wird als *äußere Orientierung* bezeichnet³.

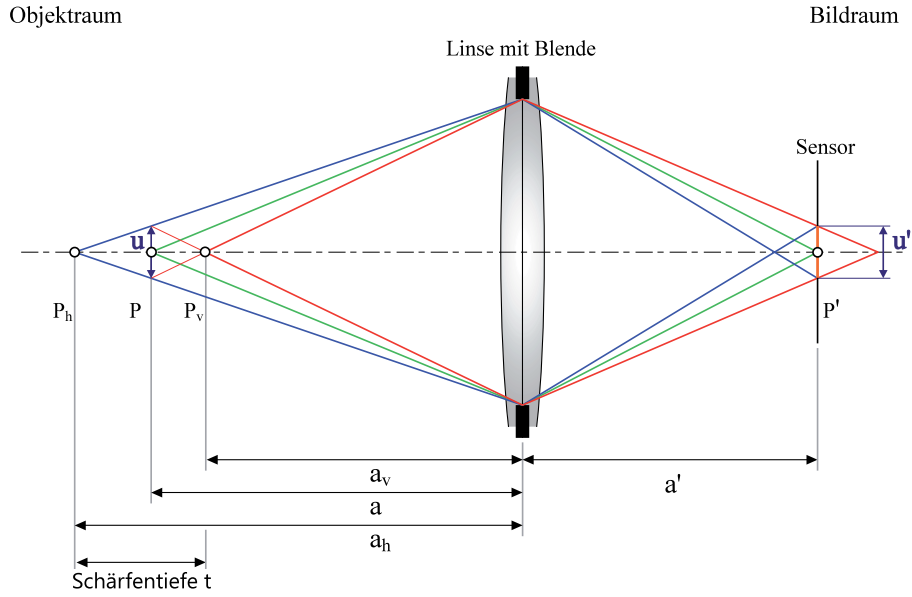
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{R} \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{I} & -\mathbf{t} \end{array} \right] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{mit: } \mathbf{I} \text{ als 3x3-Einheitsmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_x \cdot c & s' & x'_0 \\ 0 & m_y \cdot c & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -t_x \\ 0 & 1 & 0 & -t_y \\ 0 & 0 & 1 & -t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.3.3 Scharfabbildung

Ein Punkt mit dem Abstand a zum objektseitigen Hauptpunkt \mathbf{H} der Linse wird in einer Sensor- bzw. Bildebene mit Abstand a' im Bildraum scharf abgebildet. Praktisch werden aber Objekte auch dann als scharf wahrgenommen, wenn diese in bestimmten Grenzen vor oder hinter diesem Punkt liegen. Dies ist vom Durchmesser u' des Unschärfekreises (auch Zerstreuungskreis) abhängig, welcher bei optischen, digitalen Systemen mit etwa 1 bis 3 *Pixeln* angenommen werden kann [Luh10b]. In Abbildung 2.12 ist der Sensor mit dem Unschärfekreis u' dargestellt. Ausgehend davon lässt sich die Nahpunktdistanz a_v sowie die Fernpunktdistanz a_h bestimmen. Der Bereich zwischen Nahpunkt \mathbf{P}_v und Fernpunkt \mathbf{P}_h wird als Schärfentiefe t bezeichnet.

³Die innere Orientierung wird als intrinsische; die äußere Orientierung auch als extrinsische Orientierung bezeichnet.


 Abb. 2.12: Schärfentiefe t nach LUHMANN [Luh10b]

Grundlegenden Einfluss auf die Schärfentiefe hat die Größe der Lichtbündelbegrenzung des Objektivs. Damit ist zum einen die Chipabmessung (Feldblende) des Sensors sowie die Linseneinfassung, zum anderen auch mechanische Elemente wie die Aperturblende zusammengefasst. Ferner regeln die Bündelbegrenzungen auch die auf den Sensor eintretende Lichtmenge. Im Folgenden wird als Blende die mechanisch einstellbare Aperturblende gemeint. Des Weiteren gilt, dass die Eintrittspupille EP sowie die Austrittspupille AP , also die objekt- und bildseitigen Bilder der Aperturblende, gleich groß (Durchmesser D) und mit den Ebenen durch die Hauptpunkte \mathbf{H} und \mathbf{H}' zusammenfallen. Dies gilt bei symmetrisch aufgebauten Objektiven [Hec05, Luh10b]. Die Öffnung der Blende lässt sich mit der Blendenzahl k ausdrücken und gemäß Gleichung (2.23) bestimmen.

$$k = \frac{f}{D} \quad (2.23)$$

Kameraobjektive haben i. d. R. definierte, einstellbare Blendenzahlen von z. B. 1; 1.4; 2; 2.8; 4; 5.6; 8; 11 usw. Der Einfluss der Blendenzahl auf die Schärfentiefe, sowie die Lage von Nah- und Fernpunkt zur Linse kann nach [Luh10b] wie folgt beschrieben werden:

$$a_v = \frac{a}{1 + K} \quad (2.24)$$

$$a_h = \frac{a}{1 - K} \quad (2.25)$$

mit
$$K = \frac{k(a - f)u'}{f^2}$$

Die Schärfentiefe lässt sich mit $a_h - a_v$ berechnen. Mit (2.24) und (2.25) ergibt sich:

$$t = a_h - a_v = \frac{2u'k(1 + \beta')}{\beta'^2 - \left(\frac{u'k}{f}\right)^2} \quad (2.26)$$

Folglich können Bündelbegrenzungen dahin gehend Einfluss auf die Schärfentiefe nehmen, als dass große Blendenzahlen (kleine Blendenöffnungen, vgl. Gleichung (2.23)) die Schärfentiefe erhöhen. Dadurch sinkt aber auch die einfallende Lichtmenge auf den Sensor, was längere Belichtungszeiten nach sich ziehen kann. In Abbildung 2.13 ist der Unschärfekreis in Abhängigkeit der Blende dargestellt. Der Abstand der Schnittpunkte der Brennstahlen im Bildraum der jeweiligen zulässigen Scharfabbildungen nennt man Fokustiefe.

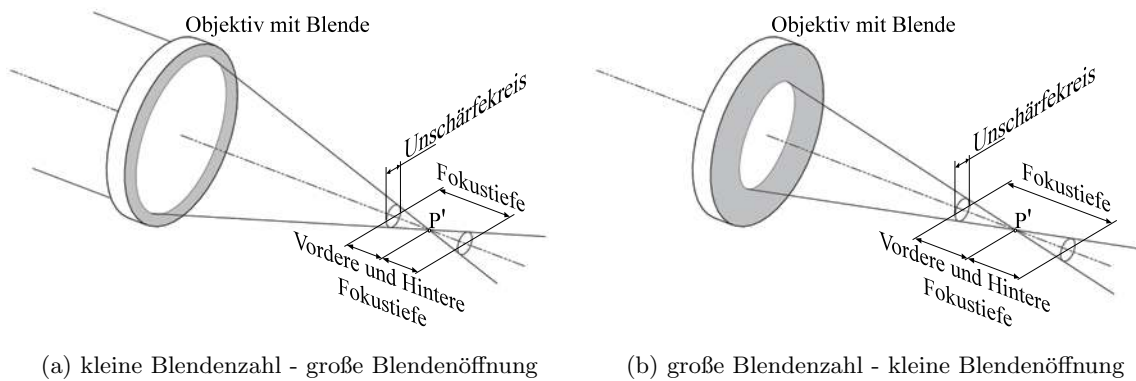


Abb. 2.13: Verschiedene Blendenöffnungen verändern die Fokus-, und damit auch die Schärfentiefe. In Abbildung 2.13a verringert eine große Blendenöffnung die zulässige Fokustiefe im Vergleich zu Abbildung 2.13b.

2.3.4 Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Aufnahmesystems wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Zum einen besitzt das Objektiv in Abhängigkeit von der Beugung und Bündelbegrenzung eine begrenzte Auflösung δ . Diese entspricht in etwa dem Radius der Airy-Scheibe (vgl. Abschnitt *Physikalische Grundlagen: Beugung, Brechung und Reflexion* im Anhang, Seite 139), die bei kreisrunden Lochspalten durch Beugung des Lichtes entsteht (2.27). Zwei Lichtpunkte können folglich im Bild nur von einander unterschieden werden, wenn ihr Abbild weiter auseinander liegt als δ .

$$\delta = 1.22 \frac{\lambda f}{D} = 1.22 \lambda k \quad (2.27)$$

Zum anderen besitzt jeder Film oder Sensor ein geometrisches Auflösungsvermögen (Ortsauflösung), welches die Detailwiedergabe des Sensors beschreibt. Die Angabe erfolgt in Linien

pro Millimeter L/mm oder in *dots per inch* (*dpi*) und ist somit ein Maß für den übertragenen Informationsgehalt. In Abbildung 2.14 ist die Übertragung eines Testmusters mit variabler Linienbreite (variablen Ortsfrequenzen) dargestellt. Je nach Sensor und Auflösungsvermögen sinkt die Fähigkeit, das Muster des Originals zu empfangen. Das hat zur Folge, dass bei hohen Ortsfrequenzen die Übertragungsintensität der Information und somit der Informationsgehalt sinkt.

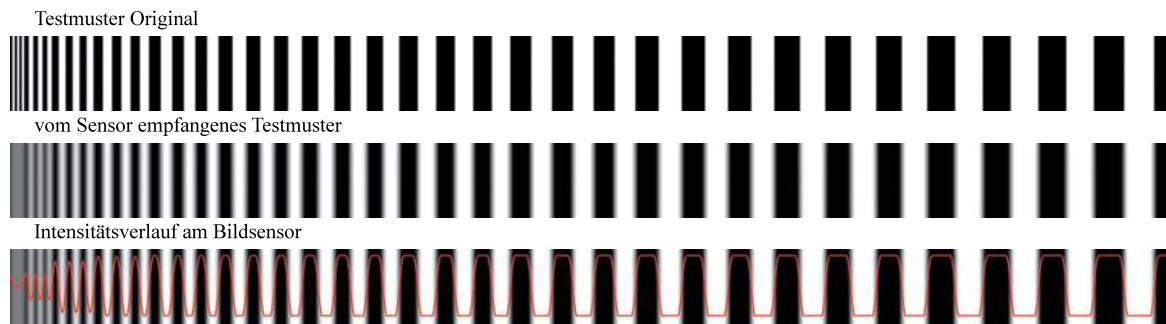


Abb. 2.14: Linienmuster mit variabler Linienauflösung wird vom Bildsensor empfangen. Je nach Auflösung treten verschiedene Intensitäten der übertragenen Funktion auf.

Die Bestimmung des Auflösungsvermögens erfolgt visuell durch Abbildung verschiedener Testmuster. In Abbildung 2.15 ist ein sogenannter Siemensstern abgebildet. Durch das begrenzte Auflösungsvermögen des Sensors kann das Zentrum des Kreises nicht mehr aufgelöst werden und es entsteht ein unscharfer, grauer Fleck. Mit dem Durchmesser des Flecks sowie durch die Anzahl der im Kreis dargestellten Schwarz-Weiß-Streifen lässt sich das Auflösungsvermögen AV des Systems bestimmen [Luh10b].

$$AV = \frac{n}{\pi d} \quad \begin{array}{l} n \dots \text{Anzahl der Streifen} \\ d \dots \text{Durchmesser des grauen Fleckes} \end{array} \quad (2.28)$$

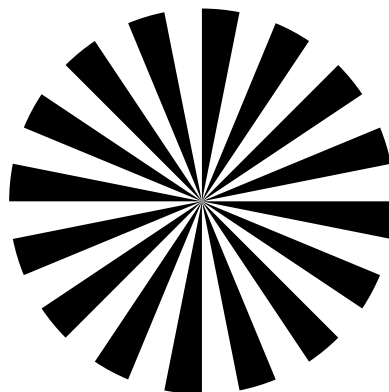


Abb. 2.15: Zum Abschätzen des Auflösungsvermögens eines optischen Aufnahmesystems verwendeter Siemensstern.

Des Weiteren beschreibt die Strukturauflösung die Möglichkeit einzelne Strukturen so abzubilden, so dass diese mess- bzw. prüfbar sind. Diese Angaben sind wesentlich gröber, als das optische Auflösungsvermögen des Sensors und hängt vom Verhältnis des zu detektierenden Merkmals zur Menge der aufgenommenen Messpunkte ab. Im Verhältnis von oberflächenerfassenden Streifenprojektionssensoren zu Koordinatenmessmaschinen ist die Strukturauflösung Letzterer aufgrund der niedrigen Messpunktanzahl deutlich kleiner.

2.3.5 Bildmaßstab

In Gleichung (2.12) wurde der Abbildungsmaßstab β' als Verhältnis von Bild zu Objektgröße eingeführt. Dieser Wert wird auch als Bildmaßstab M_b oder als transversale Vergrößerung bezeichnet und kann auch durch die Angabe der Kamerakonstante c und der Aufnahmeentfernung h bestimmt werden (2.29).

$$M_b = \beta' = \frac{c}{h} \quad (2.29)$$

In Abbildung 2.16 ist die Abhängigkeit der Kamerakonstante und der Aufnahmeentfernung auf den Bildmaßstab dargestellt. Bei gleichen Kameraparametern und steigendem Messabstand sinkt der Bildmaßstab. Gleiches geschieht beim Verringern der Kamerakonstante. Die Änderung der Kamerakonstante kann durch die Veränderung der Brennweite erfolgen. Werden bei gleicher Aufnahmeentfernung, Objektive mit größerer Brennweite verwendet, steigt der Bildmaßstab.

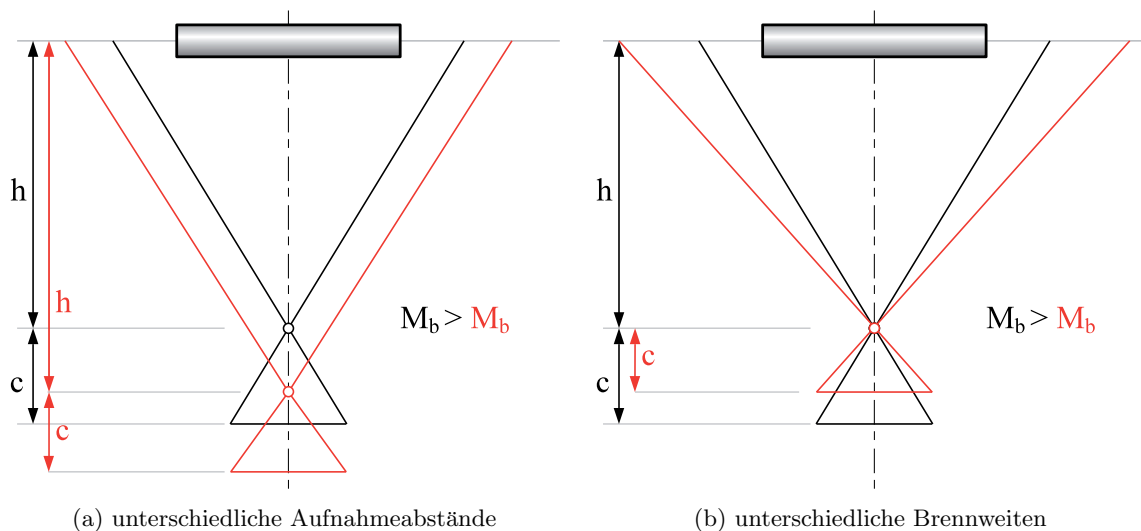


Abb. 2.16: Einfluss von Aufnahmeabstand h und Kamerakonstante c auf den Bildmaßstab M_b nach [Luh10b]

Bezogen auf eine Objektoberfläche gilt der Bildmaßstab nur, wenn diese Fläche senkrecht zur Aufnahme­richtung liegt. Wie in Abbildung 2.17 kann aber das beobachtete Objekt bezogen auf die Aufnahme­richtung verkippt sein. In diesem Fall ist die Bestimmung des Bildmaßstabes durch Gleichung (2.29) nicht gültig. Vielmehr lässt sich nur der objektbezogene Abbildungsmaßstab β' nach Gleichung (2.12) berechnen. Gleiches gilt für Objekte oder Objektgruppen mit großer räumlicher Tiefe. Ist die Angabe des Bildmaßstabes gefordert, kann ein mittlerer Bildmaßstab mit einer mittleren Aufnahme­entfernung h^* bestimmt werden.

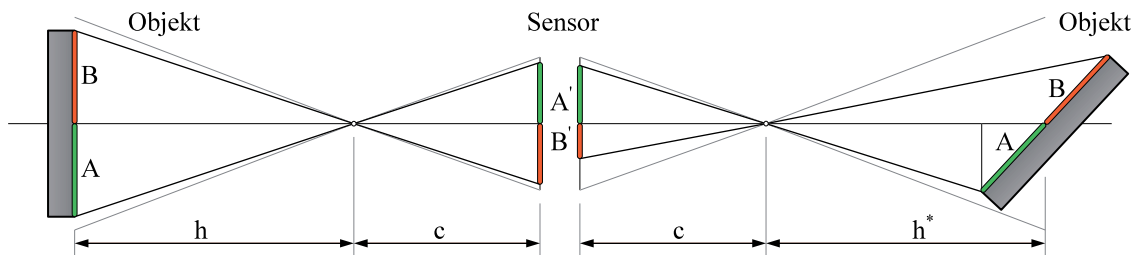


Abb. 2.17: Aufgrund von großen Unterschieden in der Aufnahme­entfernung von Objekt zu Sensor kann der Bildmaßstab stark variieren. Links liegt die abgebildete Objektstrecke senkrecht zur Aufnahme­richtung, Rechts ist das Objekt gegenüber der Aufnahme­richtung verdreht.

2.4 Abbildungsfehler und Beeinflussungsfaktoren

Kein optisches System ist in der Praxis ideal. Grund dafür sind Fertigungsungenauigkeiten die jedem Herstellungsprozess unterliegen. Folglich kommt es zu Fehlern in der optischen Abbildung, die reduziert bzw. korrigiert werden müssen. Fehler, die bei der Verwendung von monochromatischem Licht (Licht mit engem Wellenlängenbereich) entstehen, werden i. d. R. als *geometrische Fehler* bezeichnet. Fehler, die durch die unterschiedliche Dispersion verschiedener Wellenlängen entstehen, werden *chromatische Fehler* genannt [Luh10b]. Im Folgenden ist eine Auswahl von Fehlern beschrieben. Auf andere Abbildungsfehler wie Koma, Astigmatismus oder Fehler, die durch abfallende Intensität des einfallenden Lichtes (z. B. Vignettierung) hervorgerufen werden, wird auf gängige Literatur wie [Hec05, Luh10b, ST02] verwiesen.

Chromatische und sphärische Aberration Sichtbares Licht besteht aus einer Vielzahl von Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm . Des Weiteren soll gelten, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Wellenlänge abhängig ist. Aus Gleichung (A.3) folgt, dass einzelne Lichtbestandteile an Mediumübergängen unterschiedlich gebrochen werden (*Dispersion*). Das führt in einem Objektiv zur *chromatischen Aberration*, bei der sich die Brennpunkte aller Wellenlängen unterscheiden. Die Wellenlänge(n),

die direkt im Fokuspunkt bündeln, bezeichnet man als *primäres Spektrum*. Wellenlängen, die vor oder hinter der Bildebene liegen, als *sekundäres Spektrum* [Züg]. Die Folge, insbesondere durch das sekundäre Spektrum, ist die Entstehung von Farbsäumen an Objektkanten. Dadurch können z. B. Fokussierungsprobleme oder Ungenauigkeiten bei der Markerdetektion (speziell bei weißen Markern auf schwarzem Hintergrund, vgl. Abbildung 2.18) auftreten. Ferner ändert sich der Abbildungsmaßstab in Abhängigkeit zur Entfernung zur optischen Achse, da mit steigendem Bildradius auch der Effekt der chromatischen Aberration steigt.

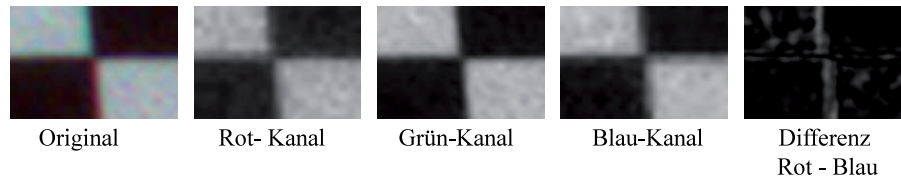


Abb. 2.18: Farbaufnahme eines Schachbrettmusters (Ausschnitt) mit chromatischer Aberration und den jeweiligen Farbkanälen (Rot, Grün, Blau). Im Bild rechts ist die Differenz zwischen Rot- und Blaukanal abgebildet.

Die Verwendung von mehreren Linsentypen mit verschiedenen Dispersionen oder die unterschiedliche Wichtung der Farbkanäle ermöglichen die Reduzierung der chromatischen Aberration. So können z. B. achromate⁴ und apochromate⁵ Linsen chromatische Abweichungen durch mehrere Wellenlängen reduzieren. In bestimmten Situationen kann auch nur der Grün-Kanal (mittlerer Wellenlängenbereich) genutzt werden, was der Verwendung eines Grauwertsensors entspricht.

Bei der *sphärische Aberration* werden Lichtstrahlen abhängig von der Einfallshöhe (Abstand des achsenparallelen Lichtstrahls zur optischen Achse) unterschiedlich stark abgelenkt. Durch die Verwendung guter Objektive und der Einschränkung, nur achsennahe Strahlen zuzulassen, kann man den Abbildungsfehler durch sphärische Aberration minimieren.

Verzeichnung In bestimmten Fällen, besonders für nicht achsennahe Strahlen, ist es möglich, dass der Bildmaßstab M_b eine Funktion des Abstandes r zur optischen Achse darstellt. Somit ändern sich Brennweite und Skalierung für nicht achsennahe Strahlen. Ein orthoskopisches Bild (Abb. 2.19 links) wird bei positiver oder kissenförmiger Verzeichnung nach außen hin vergrößert (Abb. 2.19 mitte). Bei negativer oder tonnenförmiger Verzeichnung wird das Bild radial verkleinert (Abb. 2.19 rechts). Die Ursache liegt in der Ablenkung von Lichtstrahlen durch verschiedene Bündelbegrenzungen, welche eine Abweichung zwischen Einfalls- und Ausfallswinkel (τ bzw. τ' , wobei bei Verzeichnung gilt: $\tau \neq \tau'$) des Hauptstrahles beim Linsendurchgang verursacht. Die Folge ist eine zur optischen Achse symmetrische Veränderung der Bildkoordinate y' um einen Betrag $\delta y'$ (vgl. Gleichung (2.30)), welche

⁴Linsen, die zwei Wellenlängen in der Bildebene bündeln können.

⁵Linsen mit speziellen Glassorten (z. B. Langkronglas), die auch das sekundäre Spektrum korrigieren können.

als *radial-symmetrische Verzeichnung* bezeichnet werden kann. Radial-asymmetrische und tangentielle Verzeichnungen werden i. d. R. durch schief eingebaute Linsen im Objektiv hervorgerufen.

$$\delta y' = y' - c \cdot \tan(\tau) \quad (2.30)$$

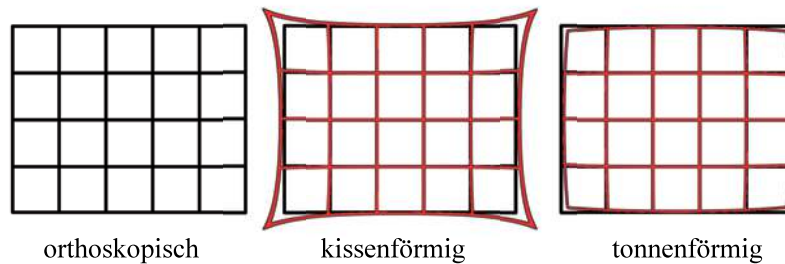


Abb. 2.19: Mögliche Verzeichnungen eines Bildes. v.l.n.r.: orthoskopisch, kissenförmig, tonnenförmig

Die Abbildungsfehler durch Objektivverzeichnungen lassen sich durch eine entsprechende Kalibrierung der Sensoren weitestgehend vermeiden. Auch durch eine spezielle Konstruktion des Objektivs, z. B. der Einbau der Blende mittig zwischen zwei identische Linsen kann den Verzeichnungsfehler, sowie chromatische Aberrationen reduzieren.

Lichtabfall Durch die Abschattung von Objektivbauteilen kann es zu Verdunkelungen zum Bildrand hin kommen. Diese werden als *Vignettierung* bezeichnet. Gleichfalls sinkt die vom Sensor erfasste Lichtintensität mit steigendem Abstand zur optischen Achse nach dem \cos^4 Gesetz ab (vgl. [Luh10b], siehe auch Abschnitt *Sensor- und Projektoreigenschaften*, Seite 41). Dieser Effekt des Randlichtabfalles ist bei kleineren Brennweiten intensiver als bei größeren Brennweiten.

Dynamik Die Dynamik eines optischen Sensors beschreibt, mit wie vielen verschiedenen Kontrasten eine Größe detektiert werden kann. Im Falle einer Kamera gibt der Dynamikumfang an, wie viele verschiedene Grauwerte differenziert werden können. Äquivalent dazu besitzt auch ein Projektor einen definierten Kontrastumfang der projizierten Grau- bzw. Farbwerte.

2.5 Abbildungstransformation

Die mathematische Beschreibung der Abbildung erfolgt mit homogenen Koordinaten (siehe Abschnitt *Mathematische Beschreibung der Zentralprojektion*, Seite 19). Dabei ist die

komplette Transformation eines dreidimensionalen Objektes in ein zweidimensionales Abbild mittels Zentralprojektion gemeint. Diese Form der Abbildung wird zur Beschreibung in photogrammetrischen Applikationen genutzt und ermöglicht die Projektion eines Raumpunktes in seinen Bildpunkt auf einer Bildfläche.

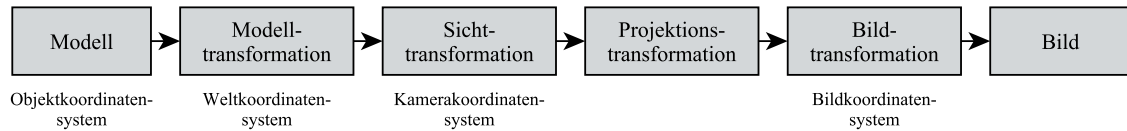


Abb. 2.20: Transformationskette zur Abbildung eines Objektpunktes in einer Bildebene

Die Transformation vom Objekt- ins Bildkoordinatensystem erfolgt über eine Transformationskette (Abbildung 2.20). Dabei wird ein Objekt, welches im objekt-eigenen Koordinatensystem liegt, zuerst in der Szene (Welt) positioniert. Vom Weltkoordinatensystem aus erfolgt eine Sichttransformation in das Kamerakoordinatensystem. Dieses liegt mit dem Ursprung im Projektionszentrum der Kamera, wobei die negative Z-Achse der Blickrichtungsvektor (*Cam-Forward-Vektor*) ist und die Y-Achse nach oben zeigt (auch *Cam-Up-Vektor* genannt). Die X-Koordinatenachse wird als sog. *Cam-Right-Vektor* bezeichnet. Es folgen eine Projektionstransformation und die Bildtransformation. Die Beziehung und Lage der Objekte und der Kamera im Raum sind in Abbildung 2.21 beispielhaft dargestellt.

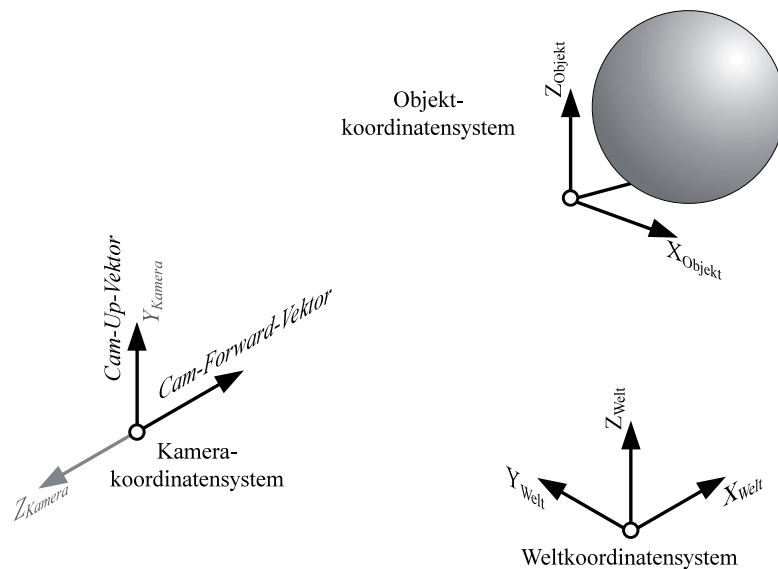


Abb. 2.21: Koordinatensysteme der Abbildungstransformationskette

2.5.1 Transformationskette

Die Transformation von Punkten im Weltkoordinatensystem ins Kamerakoordinatensystem kann mit Matrix \mathbf{P}_K aus Gleichung (2.31) ausgedrückt werden. Diese bestimmt sich aus

der Angabe der Koordinatenachsen des Kamerasystems. Dabei gilt, dass die Z-Achse dem negativen Cam-Forward-Vektor \vec{cf} , die Y-Achse dem Cam-Up-Vektor \vec{cu} und die X-Achse dem Cam-Right-Vektor \vec{cr} entspricht. Die Position der Kamera wird mit dem Positionsvektor \vec{cp} beschrieben. Alle Vektoren werden im Weltkoordinatensystem ausgedrückt.

$$\mathbf{P}_K(\vec{cr}, \vec{cu}, \vec{cf}, \vec{cp}) = \begin{bmatrix} \vec{cr}_x & \vec{cu}_x & -\vec{cf}_x & \vec{cp}_x \\ \vec{cr}_y & \vec{cu}_y & -\vec{cf}_y & \vec{cp}_y \\ \vec{cr}_z & \vec{cu}_z & -\vec{cf}_z & \vec{cp}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Die Projektionstransformation setzt sich aus perspektivischer Transformation (\mathbf{P}_Z) und Normalisierungstransformationen (\mathbf{P}_I und \mathbf{P}_S) zusammen. Ziel dabei ist, die Objektkoordinaten aus dem Kamerakoodinatenystem in ein normiertes, verzerrtes Sichtvolumen zu transformieren, wobei die Grenzen denen des sichtbaren Bereiches entsprechen. Es gilt:

$$x..[-1; 1] \quad y..[-1; 1] \quad z..[0; 1]$$

Werte außerhalb der angegebenen Bereiche liegen außerhalb des Sichtfeldes.

Die perspektivische Transformation kann durch die Matrix \mathbf{P}_Z (2.32) beschrieben werden. Die Variablen *near* und *far* begrenzen das Sichtvolumen in der Tiefe. Dabei ist *near* der Abstand zwischen Projektionszentrum und der vorderen Sichtvolumenebene (Abbildung 2.22), *far* der Abstand zur hinteren Sichtvolumenebene.

$$\mathbf{P}_Z(near, far) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k-1} & \frac{k}{k-1} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{wobei: } k = \frac{near}{far} \quad (0 < k < 1) \quad (2.32)$$

Gleichung (2.33) beschreibt die Größe des Sichtfeldes, welches durch die Öffnungswinkel in horizontaler Richtung θ_h bzw. $\theta_{horizontal}$ und in vertikaler Richtung durch θ_v bzw. $\theta_{vertikal}$ definiert ist. Die entsprechende Normalisierungsmatrix \mathbf{P}_I skaliert entsprechend die X bzw. Y-Achse.

$$\mathbf{P}_I(\theta_h, \theta_v) = \begin{bmatrix} \cot \frac{\theta_h}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cot \frac{\theta_v}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

In Abbildung 2.22 sind die Sichtwinkel θ_v und θ_h anhand eines Sichtvolumens dargestellt. Praktisch wird nur der horizontale Blickwinkel angegeben (der sog. *Field of View* kurz FOV).

Unter der Bedingung, dass Kamerapixel quadratisch sind, kann der horizontale Blickwinkel aus dem Seitenverhältniss der Bildebene berechnet werden.

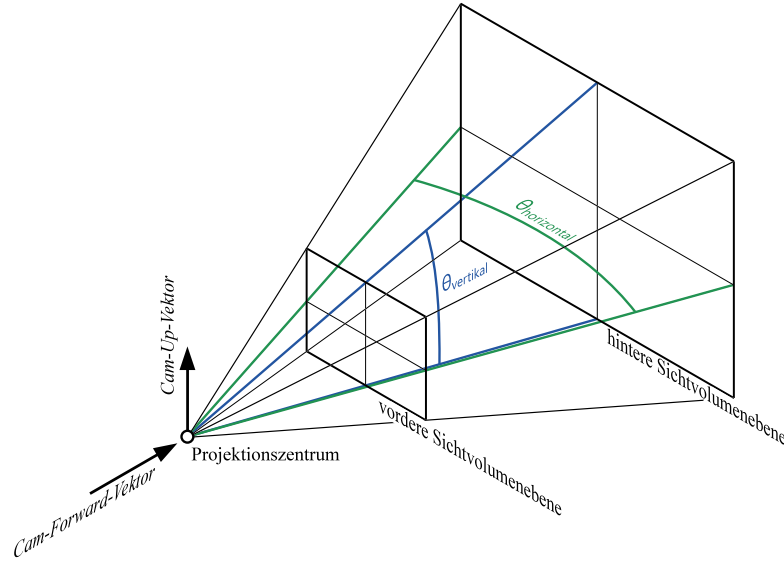


Abb. 2.22: Sichtvolumen einer zentralperspektivischen Projektion

Die Normierung auf die maximale Tiefe ($z_{max} = 1$) erfolgt durch Matrix \mathbf{P}_S (Gleichung (2.34)).

$$\mathbf{P}_S(far) = \begin{bmatrix} \frac{1}{far} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{far} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{far} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Die komplette Transformation eines Punktes \mathbf{x} aus dem Weltkoordinatensystem in einen Punkt \mathbf{x}' im perspektivischen Sichtvolumen ist im Folgenden dargestellt:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_Z \mathbf{P}_S \mathbf{P}_I \mathbf{P}_K^{-1} \mathbf{x} \quad (2.35)$$

Die einzelnen Matrizen lassen sich einer Projektionsmatrix $\mathbf{P}_{Project}$ zusammenfassen:

$$\mathbf{P}_{Project} = \mathbf{P}_Z(near, far) \mathbf{P}_S(far) \mathbf{P}_I(\theta_h, \theta_v) \mathbf{P}_K^{-1}(\vec{c}\vec{r}, \vec{c}\vec{u}, \vec{c}\vec{f}, \vec{c}\vec{p}) \quad (2.36)$$

Es folgt die Transformation in das Bildkoordinatensystem und damit die eigentliche Abbildung. Objektkoordinaten, die außerhalb des normierten Sichtvolumens liegen, sind nicht sichtbar und werden nicht weiter behandelt. Das Bild wird mit der Bildhöhe H und Bildbreite W (i. d. R. beide in Pixeln) und dem Bildursprung in der Bildmitte definiert. Die Transformation der Koordinaten vom Kamera- ins Bildkoordinatensystem erfolgt mit den Gleichungen (2.37) und (2.38) wobei x'' und y'' die Bildpunkte des Punktes \mathbf{x} darstellen.

$$x'' = \frac{W}{2}(x' + 1) \quad (2.37)$$

$$y'' = \frac{H}{2}(y' + 1) \quad (2.38)$$

2.5.2 Abbildungstransformation auf der Grafikkarte

Unter Verwendung der Grafikkarte erweitert sich der Abbildungstransformationsprozess um einige Methoden und Begriffe. Dreidimensionale Objekte werden zur Darstellung auf der Grafikkarte i. d. R. mit einer diskreten Oberflächenbeschreibung (Punkte, Facetten, etc.) beschrieben. Facetten werden durch die definierte Angabe von Vertices (Knotenpunkte) definiert, wobei den Vertices auch Eigenschaften wie Farbe, Textur-Koordinaten, etc. vergeben werden können. In Abbildung 2.23 ist die Abbildungstransformation, die sog. Renderpipeline, dargestellt. Dieser Prozess beschreibt die Abbildung einer Geometrie auf einer virtuellen Bildfläche. Ein Durchlauf dieser Kette wird als *Frame* bezeichnet.

Die Rasterisierung beschreibt die Darstellung von kontinuierlichen Geometrieobjekten wie Linien oder Flächen im Bild. Dazu müssen diese Elemente an das Pixelraster der Bildfläche angepasst werden. Des Weiteren kommen verschiedene Shadings und Sichtbarkeitstests zur Anwendung. Sogenannte Shadingalgorithmen sorgen für die Farbinterpolation von Vertex zu Vertex innerhalb einer Fläche oder Linie.

Die Bereiche *Modelview - Transformation* und *Projektionstransformation* sowie die *Sichtbarkeitstests* als auch das *Shading* können vom Anwender gezielt definiert werden. Dazu werden Shader-Programme genutzt, welche sich in Vertexshader (Transformation der Knotenpunkte), Geometrieshader (Löschen, Hinzufügen, Editieren von Knotenpunkten) und in Pixelshader (Änderung der Darstellung eines Pixels) unterscheiden. Die Programme werden am Beispiel der Programmierschnittstelle *OpenGL* (**O**pen **G**raphics **L**ibrary) in C-ähnlichen Code-Snippets der Grafikkarte übergeben. Es ist möglich zur Laufzeit, bzw. in jedem Renderschritt, einzelne Variablen im Shadercode zu ändern.

Ferner bietet eine Grafikkarte die Möglichkeit, innerhalb eines Frames und unter Verwendung von Shadern verschiedene Bildflächen (sog. Framebuffer) beschreiben zu können. Diese Eigenschaft erlaubt es dem Nutzer, neben dem Geometriebild, z. B. den Abstand zum Projektionszentrum mit einer Farbe zu codieren (Tiefenbild) oder den an dem Bildpunkt vorhandenen Normalenvektor (x, y, z -Koordinaten werden im Rot, Grün und Blau-Kanal eines Bildes abgebildet) zu verschlüsseln. Zum tieferen Studium der Funktionsweise einer Grafikkarte und deren Programmierung sei auf gängige Fachliteratur, z. B. [Zep04, RLKG09], verwiesen.

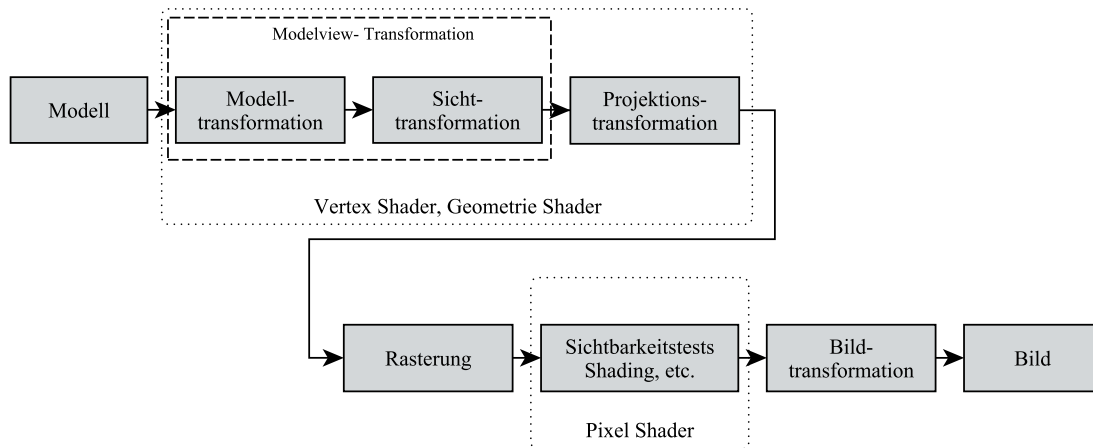


Abb. 2.23: Renderpipeline moderner Grafikkarten (vgl. [RLKG09]). Dargestellt sind die durch Shader-Programme beeinflussbaren Teilprozesse.

2.6 Streifenprojektionsverfahren

Die Verwendung von räumlich-codiertem Licht zur vereinfachten Lösung des Korrespondenzproblems ist die Grundlage für das Streifenprojektionsverfahren. Ein prinzipieller Aufbau eines solchen Erfassungssystems mit zwei Kameras (**Cam₁** und **Cam₂**) und einem Projektor **Prj** ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Dabei werden durch den Projektor in zeitlicher Abfolge verschiedene Streifenmuster projiziert. Die minimale Streifenbreite auf dem Objekt hängt von der Auflösung und der Optik des Projektors sowie der Entfernung zum Objekt ab. Folglich können nur an den Hell-Dunkel-Kanten eindeutig Punkte berechnet werden. Die Verwendung der Epipolargeometrie ermöglicht ferner die Zuordnung einzelner Punkte längs der Streifenkanten.

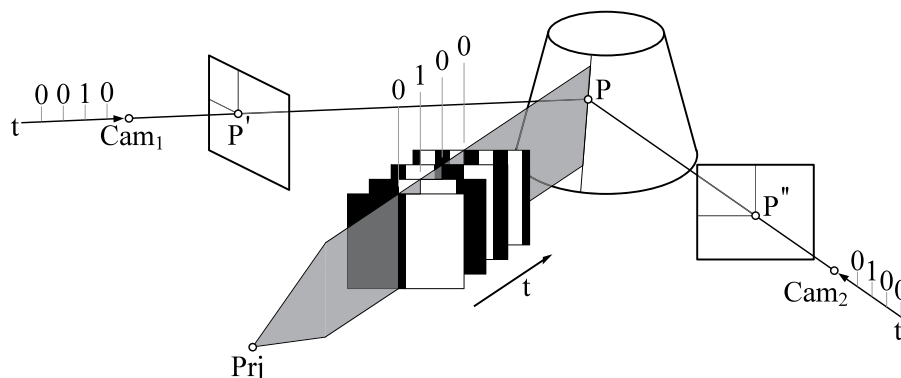


Abb. 2.24: Streifenprojektion mittels räumlich-zeitlicher Codierung nach [SW90]. Ein Projektor projiziert nacheinander Streifenmuster, welche die Korrespondenzpunktfindung in den beiden Kameras erleichtern.

2.6.1 Codierung

Die Beobachtung der Objektoberflächen und den darauf zeitlich hintereinander auftretenden Hell-Dunkel-Wechseln ermöglicht die Zuordnung eines Objektpunktes P zu seinen Bildpunkten P' und P'' . Die Codierung erfolgt durch den Helligkeitswechsel wobei i. d. R. ein dunkler Streifen einer 0, ein heller Streifen einer 1 entspricht. Somit lässt sich ein Punktbereich auf dem Objekt mit einer binären Sequenz verschlüsseln. Um Fehler bei der Decodierung zu reduzieren, wird statt eines n -stelligen Binärcodes der sog. *Graycode* verwendet (Abbildung 2.25). Dabei ändert sich von Linie zu Linie maximal ein Bit. Besonders bei Linienübergängen wird der entstehende Fehler sich demnach auf maximal einen Linienindex auswirken. Bei der binären Codierung kann eine falsche Interpretation der wechselnden Bits wesentlich größere Indexsprünge hervorrufen. Besonders die Falschinterpretation des Bits 1 hat aufgrund seiner hohen Wertigkeit bei der Umrechnung zum Linienindex erhebliche Auswirkungen.

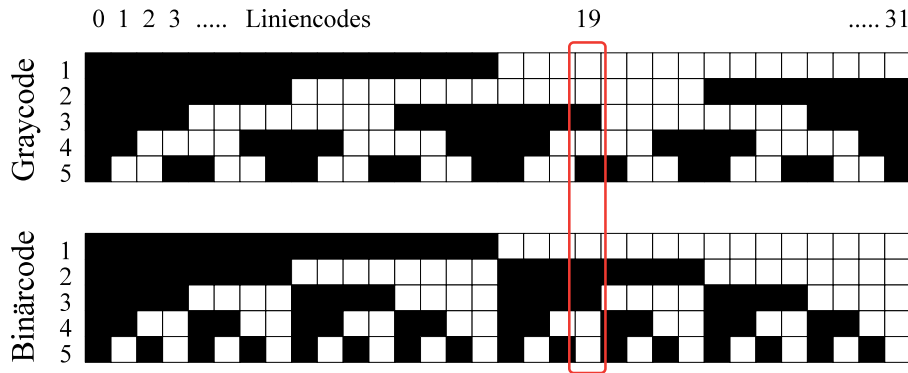


Abb. 2.25: Codierung durch Graycode (oben) und Binärcode (unten). Eine Änderung von einem Bit (hier von Index 19) ändert im Graycode den codierten Index um nur einen Punkt.

Die Umrechnung von Graycode in Binärcode erfolgt durch eine Hintereinanderschaltung von XOR-Operationen (*exklusives Oder* \oplus) zwischen den einzelnen Bits. Die Umrechnung ist in Gleichung (2.39) und (2.40) für n -wertige Bits angegeben. Dabei sind g_i Graycode-, b_i Binärcodewerte am Bitindex i .

$$g_1 = b_1 \quad (2.39)$$

$$g_n = b_{n-1} \oplus b_n \quad (2.40)$$

Die Rücktransformation erfolgt gemäß Gleichung (2.41) und (2.42):

$$b_1 = g_1 \quad (2.41)$$

$$b_n = g_n \oplus b_{n-1} \quad (2.42)$$

Um die Auswertung der Bilder zu erleichtern, wird sowohl ein unbeleuchtetes Bild, als auch ein vollständig beleuchtetes Bild in die Streifensequenz integriert. Zum einen lassen sich Pixel ausschließen, die gar nicht vom Projektor beleuchtet bzw. gesehen werden. Zum anderen erlaubt der Vergleich von maximalem und minimalem Grauwert pro Pixel eine Aussage über einen pixelweisen Schwellwert zum binarisieren der Bilder. Somit ist die Identifizierung eines Pixels als 0 oder 1 bei der Decodierung vereinfacht.

2.6.2 Phase-Shift-Verfahren

Zur Steigerung der Genauigkeit werden bei vielen akademischen und kommerziellen Streifenprojektionsystemen zur subpixelgenauen Bildkoordinatenbestimmung weitere Verfahren wie das *Phase-Shift*-, *Line-Shift*- oder auch das *Space-Time*-Verfahren eingesetzt [Güh02]. Besondere Verbreitung findet dabei das Phase-Shift-Verfahren. Dabei wird ein sinusförmiges Muster auf das Objekt projiziert und für jeden Bildpunkt die zugehörige Phasenlage bestimmt. Durch diese lässt es sich auf die Bildschirmkoordinaten rückrechnen. Gleichung (2.43) stellt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Pixelintensität $I_n(x, y)$ und Phase $\phi(x, y)$ dar. Die Faktoren A und B sind Unbekannte, welche die Grundintensität und die Streifenmodulation beschreiben.

$$I_n(x, y) = A \cos(\phi(x, y) + \delta_m) + B \quad (2.43)$$

Zur Lösung der Unbekannten müssen mindestens drei Gleichungen aufgestellt werden. Dies erfolgt durch das Einsetzen unterschiedlicher Phasenverschiebungen δ_m (2.44).

$$\delta_m = (n - 1) \delta_0 \quad (2.44)$$

$$n = 1 \dots m, \quad \text{wobei } m \geq 3$$

In Abbildung 2.26 ist das, dem codierten Streifenmuster nachgelagerte, Phase-Shift-Verfahren mit vier Phasenverschiebungen dargestellt. Die eindeutige Identifizierung der Bildpixel erfolgt durch die Codierung des Streifencodes L_i , sowie durch Bestimmung der Phasenlage 1 durch die zusätzlichen Phasenwinkel 2 bis 4.

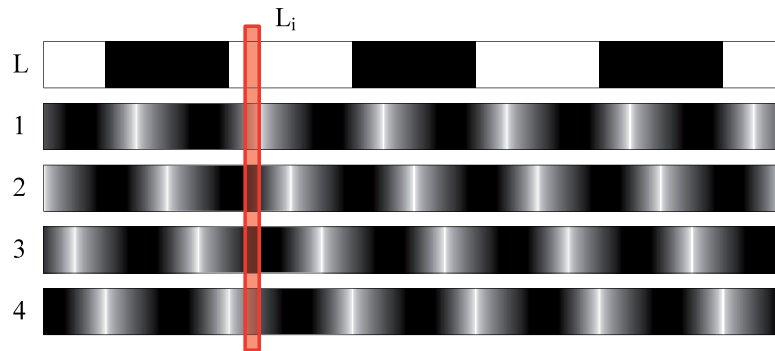


Abb. 2.26: Vierstufige Phasenverschiebung eines sinusförmigen Grauwertmusters. Die Bestimmung des Phasenwinkels erlaubt eine genauere Positionsbestimmung als allein durch das Linienmuster L an der Stelle L_i .

2.6.3 Kalibrierung

Grundlage für das Errechnen der dreidimensionalen Punktkoordinaten beim Streifenprojektionsverfahren ist die Verwendung geeigneter mathematischer Modelle. Bei bildlichen Abbildungen wird meist das Modell der Zentralprojektion (Abschnitt *Mathematische Beschreibung der Zentralprojektion*, Seite 19) verwendet. Dieses beschreibt (wie bereits erwähnt) die Geometrie von Lichtstrahlen welche von einem Objektpunkt in ein bildaufnehmendes System führen. Dabei werden auch Abbildungsfehler der realen Optik wie Objektivverzeichnungen etc. berücksichtigt. Die dafür notwendigen Werte z. B. für innere und äußere Orientierung, müssen in einem Kalibrierprozess bestimmt werden. Dabei kommen bekannte, photogrammetrische Verfahren zur Bündelblockausgleichung zum Einsatz, welche definierte Testfelder mehrfach aufnehmen und auswerten [Bro71, Tsa92, Zha00, Luh10a].

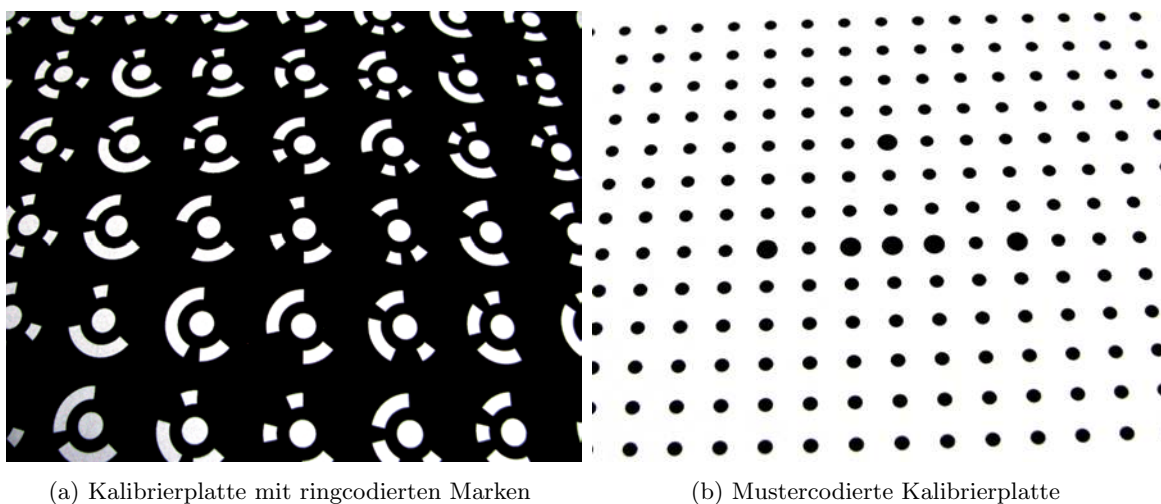


Abb. 2.27: Beispiele für verschiedene zweidimensionale Testfeldausführungen

Als Testmuster werden zweidimensionale Anordnungen von leicht und präzise erkennbaren Mustern verwendet (Abbildung 2.27). Das können Schachbrettanordnungen oder Muster mit kreisförmigen Markern sein. Um hinreichend genau die Bildkoordinaten solcher Marker detektieren zu können, müssen die Größen an das Messfeld des Systems abgestimmt werden. Gleichfalls müssen die Messpunkte (Mittelpunkte bei Kreisen, Eckpunkte bei Schachbrett- und Viereckanordnungen) gut interaktiv oder automatisch bestimmbar sein. Die Verwendung von codierten Markern (Abbildung 2.27a) oder von eindeutigen Mustern, durch welche die Indizierung aller Messpunkte möglich ist, erlaubt das Wiederfinden der Punkte in mehreren Aufnahmen. Zur Maßstabsbestimmung besitzen gängige Kalibrierplatten definierte Abstände zwischen den Messpunkten um, unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur, den Skalierungsfaktor von Bild- in Raumkoordinatensystem zu bestimmen.

Zur robusten Kalibrierung wird ferner eine definierte Aufnahmekonfiguration benötigt, welche zum einen eine ausreichend hohe Anzahl von Einzelmessungen garantiert, zum anderen Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen zum Testfeld vorschreibt. Dadurch steigt die Genauigkeit, Robustheit und Wiederholgenauigkeit einer Kalibrierung. Kommerzielle Scannerhersteller bieten dafür nutzergeführte Softwaretools, in welchen der Benutzer von Kalibrierungsschritt zu Kalibrierungsschritt geführt wird.

2.6.4 Konfiguration und Messfeld

Als Messfeld wird in dieser Arbeit der Bereich verstanden, in dem ein Scanner ein Objekt erfassen kann. Es ergibt sich als Schnittmenge der zulässigen Aufnahmevolumen aller beteiligten optischen Systeme (Kameras und Projektoren). Das zulässige Aufnahmevolumen ist begrenzt durch die horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel der Kameras, sowie deren vordere und hintere Schärfenebene. Damit ist der Bereich gemeint, in dem ein Objekt scharf abgebildet wird. In Abbildung 2.28 ist am Beispiel des kommerziellen Streifenprojektionssensors ATOS II das Messfeld visualisiert dargestellt. Es zeigt einen Polyeder, der den zulässigen Aufnahmebereich darstellt in Bezug zum symbolisch abgebildeten Sensorkopf. Anhand dieser Darstellung kann der Bediener des Scannsystems die Aufnahmeentfernung zum Objekt überprüfen und ggf. korrigieren.

Streifenprojektionssensoren können je nach Anforderung verschieden konfiguriert werden. Entscheidend dafür ist die Größe und Geometrie des zu scannenden Objektes. So können zum einen die verwendeten Kameras und Projektoren konfiguriert werden. Einstellbar sind optische Eigenschaften wie Brennweite, Pixelauflösung oder Blende, aber auch die Bauform, speziell die Größe und das Seitenverhältnis des CCD-Sensors. Durch diese Parameter kann direkt der Bildöffnungswinkel, der Bildmaßstab und die Tiefenschärfe definiert werden. Zum anderen kann die Anordnung der Kameras und Projektoren variiert werden. Verfahrensbedingt notwendig sind eine Kamera und ein Projektor. Der Projektor wird dabei als *inverse*

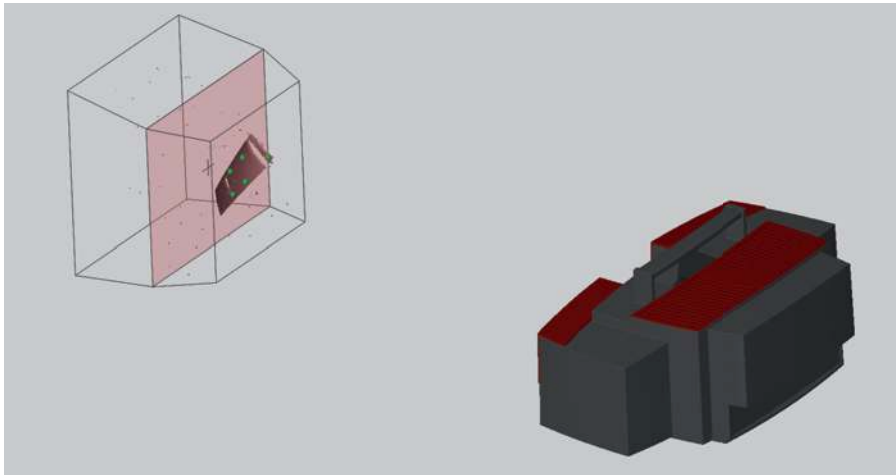


Abb. 2.28: Angedeutetes Messfeld des Scanners ATOS II von *GOM mbH*. Bildschirmfoto aus der Software *Atos Professionell 7.5*.

Kamera behandelt: zur Beschreibung wird das Lochkameramodell genutzt, aber anstatt ein Bild aufzunehmen, wird ein Bild über die Optik projiziert. Es muss vorher eine Projektor-kalibrierung erfolgen.

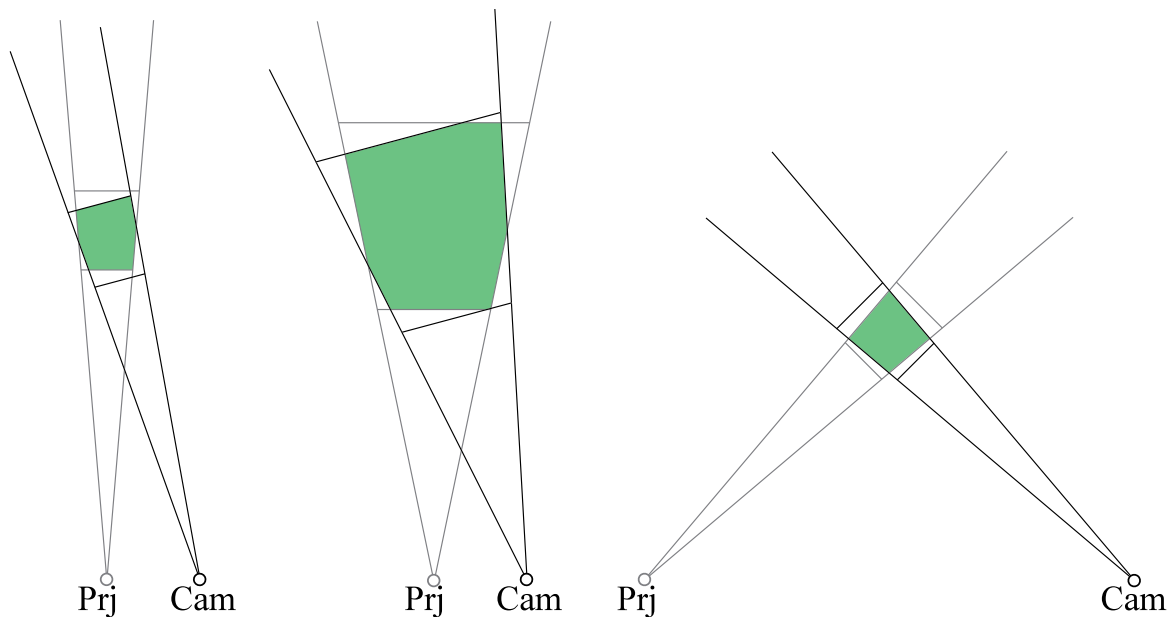


Abb. 2.29: Messfeldkonfiguration mit einer Kamera **Cam** und einem Projektor **Prj**. Die Schnittmenge (**Grün**) der einzelnen Messbereiche ergibt das Messfeld. Die Bilder Links und Rechts weisen eine gleiche Brennweite auf, aber verschieden große Triangulationsbasen. Die Abbildung in der Mitte zeigt eine kleine Brennweite und daraus resultierend ein größeres Messvolumen.

Der Projektor und die Kamera können in verschiedenen Orientierungen zueinander realisiert werden. In Abbildung 2.29 ist beispielhaft eine Kamera-Projektor-Anordnung abgebildet. Links eine Konfiguration mit großer Brennweite. Aufgrund der kleinen Triangulationsbasis

ist das Messfeld verhältnismäßig klein. Bei gleicher Basis und kleinerer Brennweite (Bild Mitte) kann ein größeres Messvolumen abgedeckt werden. Rechts wird eine große Brennweite mit einer großen Triangulationsbasis gezeigt. Zu beachten ist, dass bei kleinerer Triangulationsbasis die Gefahr durch schleifende Winkel steigt (vgl. Abschnitt *Räumlicher Vorwärtsschritt*, speziell Abbildung 2.9 zur Vermeidung von schleifenden Winkeln und der daraus resultierenden Tiefenfehler bei der Punktberechnung). Jedoch ist der vom Projektor beleuchtete Bereich bei zu großem Abstand zwischen Kamera und Projektor vom Beobachter aus kaum zu sehen.

Ferner kann es bei größeren Anstellwinkeln zwischen Kamera und Projektor bei besonders komplizierten, unstetigen Bauteilgeometrien zu Verdeckungen kommen. Dadurch kann die Anzahl der notwendigen Aufnahmen, um ein Objekt mit der gewünschten Vollständigkeit zu erfassen, ansteigen.

Des Weiteren sind Scannerkonfigurationen mit zwei Kameras und einem wahlweise kalibrierten Projektor denkbar. In Spezialfällen können auch andere Konfigurationen zum Einsatz kommen [Asw12, KKN03]. Die wichtigsten Parameter zur Messfeldkonfiguration sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tab. 2.1: Einfluss wichtiger optischer und geometrischer Parameter auf die Größe des Messfeldes

Parameter	Auswirkung auf das Messfeld
Brennweite	Die Brennweite definiert den Kameraöffnungswinkel und somit auch den Bildausschnitt. Somit ist auch der Bildmaßstab einstellbar. Bei großen Brennweiten verengt sich der Öffnungswinkel. Gleichzeitig ändert sich der Bildmaßstab was zur Erhöhung der lateralen Auflösung führt.
Blende	Die Blendenzahl beeinflusst die Belichtung einer Aufnahme als auch den Tiefenschärfebereich. Hohe Blendenzahlen erfordern längere Belichtungszeiten, erhöhen aber die Tiefenschärfe.
Pixelauflösung	Die Verwendung größerer Pixelzahlen ermöglicht eine größere laterale Auflösung. Die Anzahl der Pixel pro Bild entscheidet auch über die Verwendung verschiedener Markergrößen.
Sensorgroße	Die Größe des Sensors begrenzt die Bildfläche der Kamera. Das Seitenverhältnis definiert den Öffnungswinkel in beiden Ausdehnungsrichtungen.
Anstellwinkel	Der Anstellwinkel zwischen Kamera und Projektor entscheidet über die Genauigkeit bei der Punktbestimmung. Stehen die Achsen beider Kameras ¹ im 90° Winkel zueinander, ist der Fehler minimal. Flachere Winkel erlauben aber ein sicheres Erfassen komplexer, unstetiger Bauteilgeometrien.

¹ Ein Projektor wird als inverse Kamera aufgefasst.

2.6.5 Mehrbildauswertung

In der Regel wird ein Objekt nicht vollständig mit nur einer Aufnahme erfasst. Vielmehr bedarf es mehrerer Aufnahmen aus verschiedenen Scannerpositionen. Dabei wird pro Aufnahme ein Datensatz erzeugt, dessen Punktdaten zum Scannerkoordinatensystem orientiert sind. Um aus der Vielzahl der entstandenen Punktwolken einen Datensatz zu erzeugen, müssen die Datensätze transformiert werden. Dies geschieht durch eine Koordinatentransformation mit $\mathbf{T}^{s \rightarrow g}$, wobei Punkte im Scannerkoordinatensystem in ein übergeordnetes, globales Koordinatensystem überführt werden (vgl. Gleichung (2.45)).

$$\mathbf{P}_i^g = \mathbf{T}_j^{s \rightarrow g} \cdot \mathbf{P}_i^s \quad i = [0 \dots n] \quad (2.45)$$

n Anzahl der Punkte

j Index der Aufnahme

Die für diese Registrierung notwendigen Transformationsmatrizen $\mathbf{T}_j^{s \rightarrow g}$ müssen pro Aufnahme j bestimmt werden. Dafür gibt es verschiedene Verfahren, welche in kommerziellen Scansystemen bereits integriert sind. Am bekanntesten ist die zeitgleiche Beobachtung codierter oder uncodierter Referenzmarken (auch Passmarken genannt) welche sich ortsfest auf dem Objekt befinden. Anhand dieser können über eine Mehrbildtriangulation (Bündelblockausgleich) die äußeren Parameter der jeweiligen Scannerkamera bestimmt werden. Anhand der gewonnenen Positionsdaten des Scanners lassen sich die Einzelaufnahmen in ein globales Koordinatensystem transformieren [Rei99]. In Abbildung 2.30 ist die Mehrbildauswertung anhand mehrerer Scannerpositionen dargestellt.

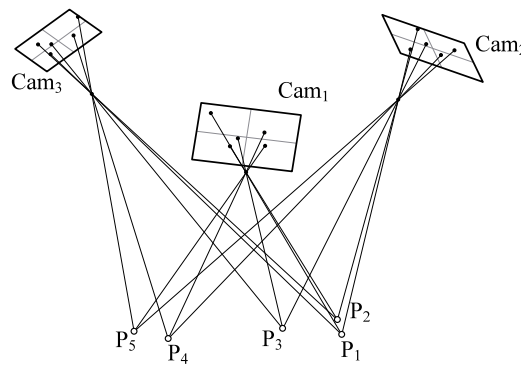


Abb. 2.30: Bestimmung der Scannerpositionen durch die Berechnung der äußeren Parameter der beim Scannen beteiligten Kameras **Cam_i** durch die Detektion von Passmarken **P_j** ortsfest auf dem Objekt

Eine weitere Möglichkeit der Registrierung der Einzelaufnahmen ist die Verwendung von numerischen Verfahren. Am bekanntesten ist dabei der *Iterative-Closest-Point-Algorithmus*, kurz ICP [BM92]. Dabei wird für eine definierte Punktmenge im Quelldatensatz eine ent-

sprechende Teilmenge im Zieldatensatz derart gesucht, dass die entstehenden (quadratischen) Punktabstände zwischen beiden Teilmengen minimiert werden. Jedoch ist die Lösung des Minimierungsproblems ein lokales Optimum, welches nicht immer die richtige Lösung erzeugt. Besonders bei regelmäßigen Geometrieelementen wie Ebenen, Kugel, Zylindern etc. liegen viele Extrema zu nah beieinander, weshalb es zu nicht gültigen Transformationen kommen kann.

Die Ausrichtung der einzelnen Datensätze kann auch über geometriebasierte Landmarken (technologische Basen) erfolgen. Dabei werden meist mehrfach erfasste, geometrisch einfach beschreibbare Elemente (Zylinderachsen, Ebenen, etc.) verwendet, die dann zueinander geordnet und übereinander gelegt werden.

Ferner kann auch die Bewegung des Scanners über dem Objekt bekannt sein, so zum Beispiel bei maschinell geführten Sensoren mittels Robotern. Dabei ist bei jeder Aufnahme die Position des Scanners in Bezug zum (Positionier-)Maschinenkoordinatensystem bekannt, anhand derer transformiert werden kann.

Allen Ausrichtungen gemein ist, dass es immer zu Transformationsabweichungen durch z. B. Ungenauigkeiten bei der Detektion von Passmarken kommen kann [Rei99, DK05, Luh10b]. Daraus resultiert eine niedrigere Genauigkeit der zusammengesetzten Teildatenmengen, was bei der späteren Nutzung der Daten bspw. für messtechnische Applikationen berücksichtigt werden muss.

2.7 Einflussfaktoren aktiver Triangulation

Die Verwendung von aktiven Triangulationsverfahren zum Erfassen von Oberflächenpunkten wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Neben den genannten physikalischen und technischen Begrenzungen (Sensorrauschen, Auflösung, Abbildungsfehler, etc.) optischer Systeme spielen im wesentlichen die radiometrischen Eigenschaften des Scannersystems, der Einfluss von Fremdlicht und die Geometrie sowie die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes wesentliche Rollen. Entscheidend zur Datenaufnahme ist die sichere Identifikation eines signalisierten Bildpunktes in mehreren Kameraperspektiven. Beim Streifenprojektionsverfahren ist die eindeutige und genaue Indexierung der Kanten des Streifenmusters als auch der projizierten Grauwertstufe beim Phase-Shift-Verfahren notwendig [Güh02, Luh10b, Wio01].

2.7.1 Sensor- und Projektoreigenschaften

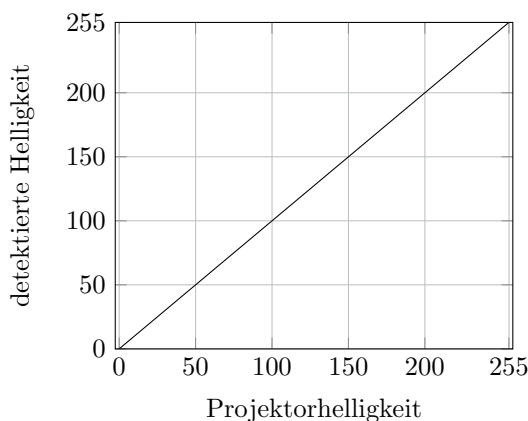
Sowohl die verwendeten Kameras als auch der Projektor unterliegen technischen und radiometrischen Begrenzungen, welche die Aufnahmen beeinflussen. So spielen die Fehler der verwendeten Optiken bei Projektoren und Kameras (vgl. Abschnitt *Abbildungsfehler und*

Beeinflussungsfaktoren, Seite 26), sowie die elektronischen Sensoren und Bauteile eine wichtige Rolle. So weisen Kameras i. d. R. unterschiedliche Empfindlichkeiten und einen unterschiedlichen Dynamikumfang Dyn (vgl. Gleichung (2.46) - Quotient aus größtem und kleinsten Helligkeitswert h_{max} und h_{min} im Bild) auf. Durch Verdeckungen und Abschattungen des Objektivaufbaues kann ein Lichtabfall (Vignettierung) auftreten. Ferner tritt ein natürlicher Randlichtabfall auf. Dieser errechnet sich nach dem Kosinus⁴-Gesetz (2.47) und beschreibt die Abnahme der Bildhelligkeit B_0 zum Bildrand (α ist die Winkelabweichung zur optischen Achse) hin.

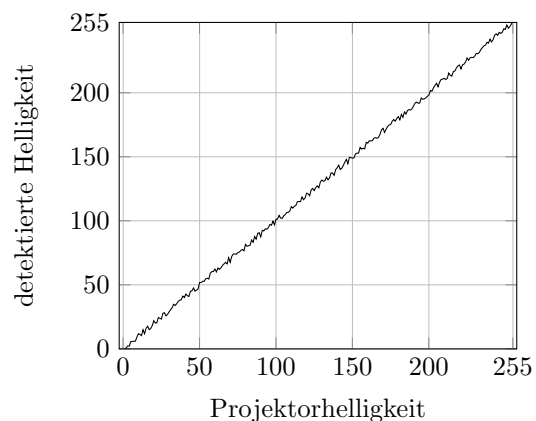
$$Dyn = \frac{h_{max}}{h_{min}} \quad \text{Dynamikumfang} \quad (2.46)$$

$$B(\alpha) = B_0 \cdot \cos^4 \alpha \quad \text{Bildhelligkeit} \quad (2.47)$$

Bei der Nutzung von Phaseshift-Verfahren ist es entscheidend, dass der projizierte Sinusverlauf der Graustufen auch als solcher detektiert wird. Kameras und Projektoren weisen allerdings einen unterschiedlichen Dynamikumfang und unterschiedliche Farbdarstellungen auf. Das hat zur Folge, dass der detektierte Sinusverlauf im Sensor gestaucht, bzw. gestreckt erscheinen kann und somit eine subpixelgenaue Punktberechnung nicht möglich ist. Dies kann durch die Einführung einer Übertragungsfunktion zwischen Projektor- und Sensorfarbwerten korrigiert werden. In den Diagrammen 2.31a und 2.31b sind die Übertragungsfunktionen für Helligkeitswerte zwischen Projektor und Kamera schematisch dargestellt. Ideale Bedingungen sind vorhanden, wenn die Helligkeits- und Farbwerte des Sensors denen des Projektors entsprechen. Ist das nicht der Fall, müssen die Werte, z. B. über eine Zuordnungstabelle korrigiert werden.



(a) ideale Helligkeitsübertragung



(b) reale Helligkeitsübertragung

Abb. 2.31: Helligkeitsübertragung vom Projektor zur Kamera. Diagramm 2.31b zeigt eine beispielhafte, reale Übertragungsfunktionen ohne Korrekturen. Abbildung 2.31a stellt den idealen Übertragungsverlauf dar.

2.7.2 Fotometrische Eigenschaften von Oberflächen

Je nach Beschaffenheit und Material haben Oberflächen unterschiedliche foto- bzw. radiometrische Eigenschaften. Für aktive optische Scanverfahren sind insbesondere die Eigenschaften in Bezug auf sichtbares Licht (Reflexion und Absorption) entscheidend.

Theoretisch lässt sich die Reflexion des Lichtes an einer Oberfläche in gerichtete, diffuse und gerichtet diffuse Reflexionen einteilen (Abbildung 2.32). In der Praxis gibt es aber ideal diffuse wie auch ideal gerichtet reflektierende Oberflächen nicht. Vielmehr setzt sich die reflektierte Lichtmenge aus einem diffusen und einem gerichteten, also spiegelnden (specular), Lichtanteil zusammen (das Modell wird als *Uniform Specular-Diffuse Reflection Model* bezeichnet [GTGB84, Bli77]). Andere Ansätze unterteilen den spiegelnden Anteil noch um einen glänzenden (glossy) Anteil (3C BRDF - three component bidirectional reflectance distribution function model [Pro12, PP12]). Im Folgenden ist mit spiegelnder und glänzender Reflexion die gerichtete Reflexion gemeint.

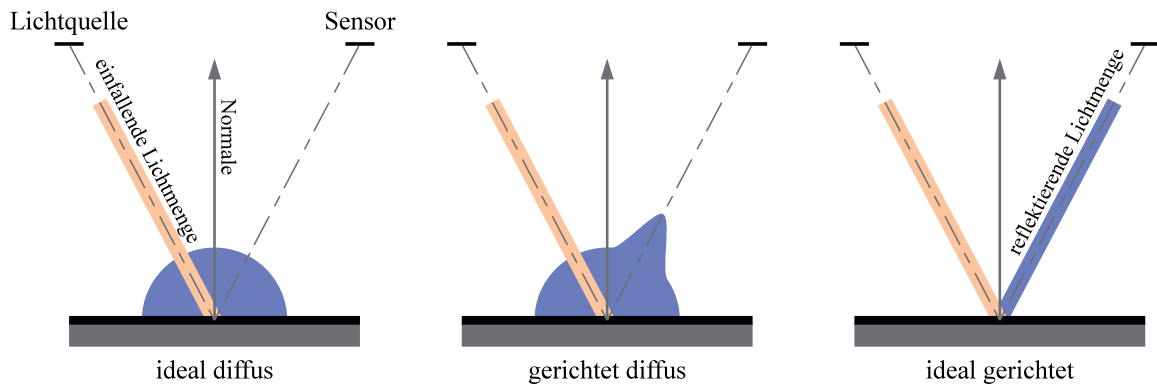


Abb. 2.32: Oberflächen reflektieren die einfallende Lichtmenge auf verschiedene Arten. Links: ideal diffuse Reflexion, Mitte: gerichtet diffuse Reflexion, Rechts: ideal gerichtete oder spiegelnde Reflexion (nach Gühring [Güh02])

Glänzende Flächen weisen einen hohen Anteil an direkt reflektierenden Lichtanteilen auf, während diffuse Flächen unabhängig von der Lichteinfallsrichtung, in alle Richtungen gleich stark reflektieren. Je geringer der gerichtete Anteil bei der Reflexion ist, desto gleichmäßiger beleuchtet erscheint das Objekt. Die reflektierte Lichtintensität kann mit dem *Lambertschen Gesetz* beschrieben werden und ist dabei abhängig vom Winkel δ zwischen Lichteinfallsvektor \vec{L} und Flächennormale \vec{n} . Die reflektierte Lichtintensität ist aber in allen Raumrichtungen gleich groß.

$$I_{ab} \sim \cos \delta \quad \text{wobei:} \quad \cos \delta = \vec{L} \cdot \vec{n} \quad (2.48)$$

$$\text{dann gilt:} \quad I_{ab} \sim \vec{L} \cdot \vec{n}$$

Ein hoher Anteil gerichteter Reflexion führt in der Regel zu starken Überbelichtungen einzelner Pixel im Sensor (sog. Glanzstellen; vgl. Abbildung 2.33 linke Seite). Ferner entsteht bei stark gerichtet reflektierenden Oberflächen ein deutlicher Helligkeitsunterschied zwischen Flächen die zum Sensor hin direkt reflektieren und anderen Flächen des Objektes. Ein Ausgleich durch längere Belichtungszeiten führt aber zu stärkerem Übersteuern der Glanzstellen. Des Weiteren kann es zu Selbstspiegelungen (Strahlungsaustausch) zwischen Teilflächen des Objektes kommen. Diese sind besonders bei stark spiegelnden Oberflächen für die Korrespondenzfindung zur Punktidentifizierung problematisch.

Die Absorption des Lichtes beschreibt, wie stark Licht von einer Oberfläche aufgenommen („verschluckt“) und nicht reflektiert wird. Im Vergleich zu einer hellen Fläche absorbiert eine schwarze Oberflächen das Licht fast vollständig. Farbige Oberflächen absorbieren einzelne Lichtbestandteile des eingebrachten Lichtes, z. B. absorbieren gelbe Oberflächen den Blauanteil des Lichtes, der reflektierende rote und grüne Anteil ergibt die gelbe Farbe der Oberfläche. Stark absorbierende Oberflächen erfordern längere Belichtungszeiten um das wenige zurückgeworfene Licht zu detektieren. Besonders Objekte mit gleichzeitig sehr hellen und sehr dunklen Flächenbereichen bereiten dahingehend Probleme, dass bei der Verwendung von nur einer Belichtungszeit pro Messung dunkle Bereiche nicht ausreichend ausgeleuchtet und somit nicht erfasst werden. Dagegen können helle Bereiche bei zu langem Belichten stark übersteuern und die projizierten Lichtmuster werden nicht erkannt. In solchen Fällen kann es hilfreich sein, mehrere Belichtungszeiten bei einer Messung zu nutzen.

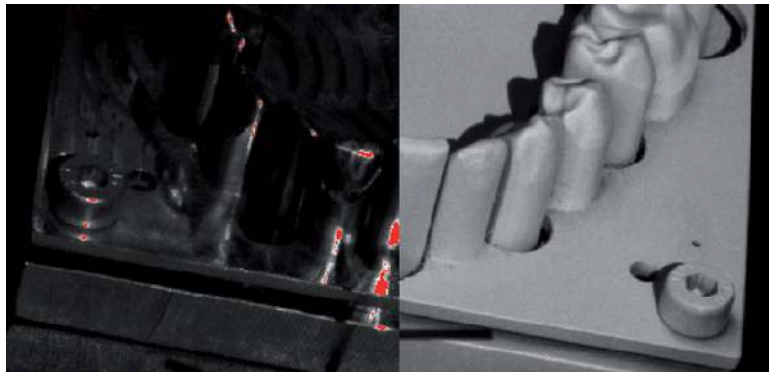


Abb. 2.33: Zur Reduzierung des Glanzes wurde ein Objekt mit speziellem Laserscanning-Entspiegelungsspray beschichtet. Die Glanzstellen (rote Bereiche, links) können dadurch deutlich reduziert werden. Durch die weiße Farbe wurden auch lichtabsorbierende Bereiche reduziert. Das Objekt ist gleichmäßig ausgeleuchtet.

In Abbildung 2.33 ist ein glänzendes Objekt (links) dargestellt, bei dem mittels Beleuchtung durch einen Projektor Glanzstellen (überbelichtete Stellen) auftreten. Diese sind an den rot hervorgehobenen Bereichen zu erkennen. Dasselbe Objekt wurde anschliessend mit einem speziellen Laserscanning-Entspiegelungsspray beschichtet (rechts). Im Ergebnis kommt es weniger zu gerichteter Reflexion, vielmehr reflektiert die Oberfläche gleichmäßig diffus.

Gleichzeitig sind dunkle Bereiche auf der ursprünglichen Oberfläche aufgehellt, was zu einer geringeren Lichtabsorption führt. Man spricht hier von einer *optisch kooperativen Oberfläche* [Güh02].

2.7.3 Beleuchtung und Fremdlicht

Beim Streifenprojektionsverfahren werden Projektoren eingesetzt, welche die Oberfläche aktiv beleuchten. Die von den Kameras empfangene Lichtmenge⁶ hängt von der vom Projektor ausgestrahlten Lichtmenge sowie von den optischen bzw. fotometrischen Eigenschaften der Oberfläche, welche das Licht absorbiert und reflektiert (siehe oben, vgl. auch Abbildung 2.34), ab. Projektoren weisen i. d. R. keine homogene Lichtstärke auf. Besonders an den Bildrändern nimmt die Helligkeit aufgrund von Abschattungen im Objektiv Aufbau ab (vgl. Abschnitt *Abbildungsfehler und Beeinflussungsfaktoren*, Seite 26). Das Objekt selbst reflektiert nur einen Teil des Lichtes, ein anderer Teil wird absorbiert. Somit fällt nur ein kleiner Teil der vom Projektor emittierten Lichtmenge vom Objekt zum Sensor. Dort begrenzen Blendenöffnungszeiten (Belichtungszeiten) sowie die Blendengröße die Menge des einfallenden Lichtes auf den Sensor. Teile der vom Projektor emittierten und von der Umgebung diffus reflektierten Strahlung trifft ebenfalls auf den Sensor, spielt aber erfahrungsgemäß bei der Erkennung des projizierten Musters auf dem Objekt keine Rolle. Die durch Selbstreflexion und Selbstspiegelung reflektierte Lichtmenge wirkt nachteilig bei der Erkennung von Mustern, kann aber bei optisch kooperativen Oberflächen der zu erfassenden Objekte vernachlässigt werden.

Fremdlicht, also Lichtquellen die nicht zum eigentlichen Aufnahmesystem gehören, beeinflussen den Prozess der aktiven Beleuchtung. Besonders ältere Systeme, die ohne spezielle Farbfilter arbeiten, sind besonders anfällig gegenüber Fremdlichteinflüssen, z. B. durch Sonnenlicht. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn während der Musterprojektion sich die Umgebungslichtverhältnisse (Wolkenzug, Flackern von Leuchtmitteln, etc.) ändern. In Folge können überbelichtete Bereiche entstehen oder aber die beim Phase-Shift-Verfahren verwendete Grauwertübertragungsfunktion verfälscht werden.

Zeitlich konstante Lichtquellen lassen sich in der Regel durch einfache Bildoperationen verrechnen. Dies ist zum z. B. möglich, indem die Grauwerte $I_{u,v}^d$ des unbeleuchteten Bildes von den Grauwerten $I_{u,v}^h$ des beleuchteten Bildes abgezogen werden (2.49). Das resultierende Bild zeigt nur noch den Einfluss der aktiven (Projektor)- Beleuchtung $I_{u,v}$ pro Pixel.

$$I_{u,v} = I_{u,v}^h - I_{u,v}^d \quad (2.49)$$

⁶Die Lichtmenge beschreibt den Lichtstrom über eine bestimmte Zeitdauer.

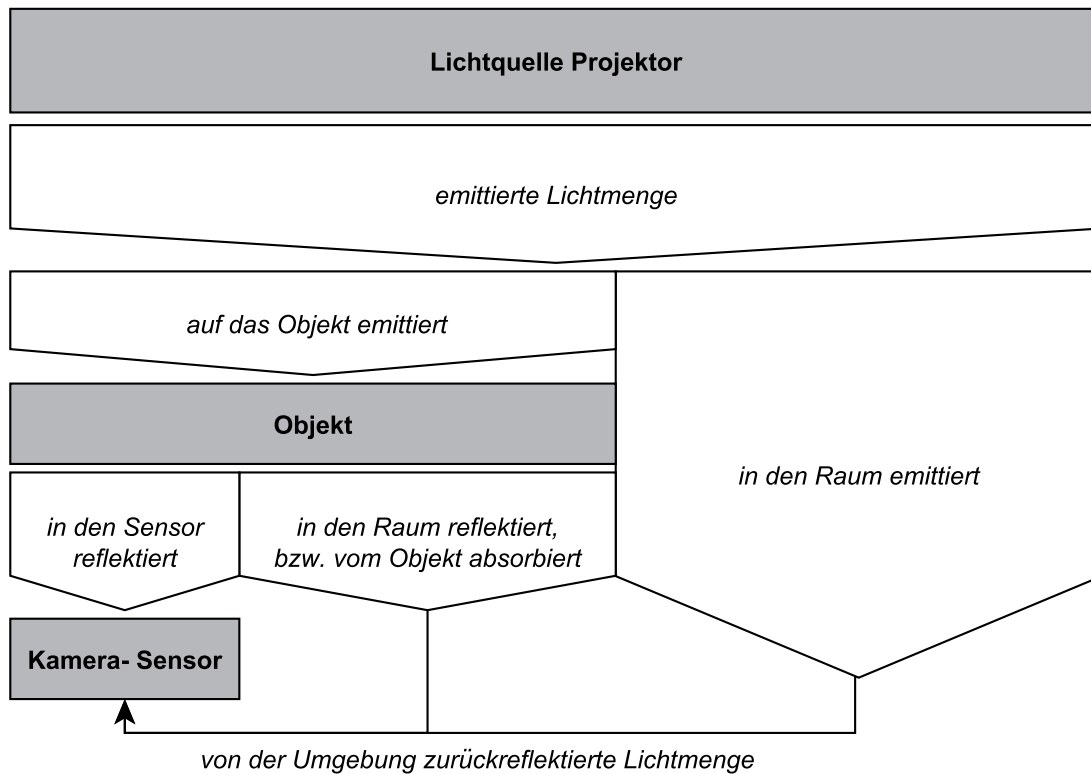


Abb. 2.34: Lichtmengenbilanz am Beispiel eines Projektors. Nur der Teil, der auf das Objekt treffenden emittierten Lichtmenge wird zum Sensor hin reflektiert. Der Betrag der Menge ist von der Geometrie und den fotometrischen Eigenschaften des Objektes abhängig.

In speziellen Messlaboren kann der Fremdlichteinfluss durch gezielte Elimination der Lichtquellen während der Aufnahmen minimiert werden. Auch die Verwendung von speziellen Vorsatzfiltern bei Projektoren und Kameras, die das emittierte Licht nur in engen Wellenlängenbereichen durchlassen, erleichtert das Erfassen der Grauwertmuster trotz Umgebungslicht erheblich.

2.7.4 Geometrie

Einen wesentlichen Einfluss auf die Datenaufnahme bei optischen Messverfahren hat die Geometrie des zu erfassenden Objektes. Besonders bei aktiven, triangulationsbasierten Verfahren und der damit verbundenen räumlichen Trennung von Sender und Empfänger (Projektor und Kamera) aufgrund der benötigten Triangulationsbasis, ist eine einfache Aussage über das Erfassen bestimmter Oberflächenbereiche nicht mehr einfach möglich. Soll ein definierter Bereich eines Objektes erfasst werden, müssen für die Triangulation am Beispiel des Streifenprojektionsverfahrens folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die verwendete aktive Beleuchtung (Streifenmuster) muss den Bereich beleuchten.
- Die Entfernung vom Objekt zum Projektor muss den entsprechenden optischen Randbedingungen des Projektors (Schärfentiefebereich, Wellenlängenbereich, Fokus, Blende, Lichtstärke etc.) angepasst sein (siehe Abschnitt *Konfiguration und Messfeld*, Seite 37).
- Auch die optischen Eigenschaften der Kameras müssen der entsprechenden Entfernung sowie an das Objekt angepasst sein.
- Mindestens zwei optische Kameras müssen das vom Projektor projizierte Streifenmuster während der Aufnahmesequenz beobachten können. Ein photogrammetrisch kalibrierter Projektor gilt als inverse Kamera.
- Bei stark glänzenden Oberflächen muss die Lichtreflexion beachtet werden (siehe ebenfalls Abschnitt *Konfiguration und Messfeld*).

In Abbildung 2.35 ist schematisch die Beleuchtung eines Objektes mittels Projektor dargestellt. Es zeigt sich, dass es schon bei geometrischen Primitiven (hier Quader) zu Verdeckungen und Abschattungen kommen kann. Die im Bild rötlich-braun hervorgehobenen Bereiche sind jene, die nicht beleuchtet werden, welche aber im sichtbaren Bereich der beteiligten Kamera liegen. Bei komplizierteren Geometrien, insbesondere bei Nuten, Bohrungen oder filigranen Strukturen ist die Aussage, welche Bereiche, bei welcher Scannerposition erfasst werden, nicht mehr einfach möglich. Ein nächster Aspekt ist, dass bei ungünstiger Projektor-Kamera-Positionierung es zu Glanzstellen im Kamerabild kommen kann.

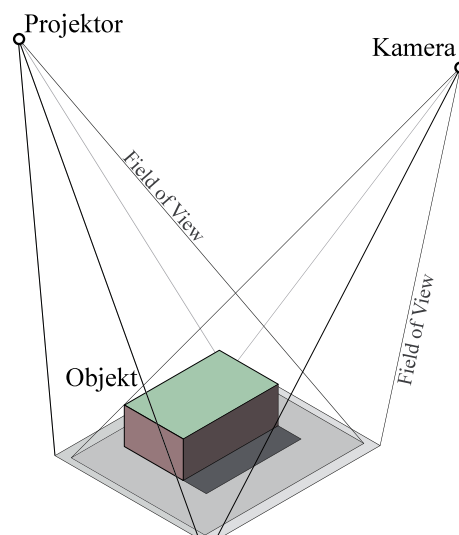


Abb. 2.35: Das projizierte Bild des Projektors beleuchtet nur den zum Projektor zugewandten Teil des Objektes. Die Kamera sieht zwar die Rückseite, das Streifenmuster zur 3D-Punkt-Berechnung ist aber abgeschattet.

2.8 Aufnahme- und Beleuchtungstechnik

Bei optischen Triangulationsverfahren werden zur Erzeugung von Abbildungen lichtempfindliche Sensoren mit entsprechenden Linsensystemen (Objektive und eventuell verbaute Lichtfilter) verwendet. Moderne Detektorsysteme nutzen zur Messung der einfallenden Lichtmenge *CCD* [HM79, Bal08] oder *CMOS* [JM97, Bak11] -Sensoren. Dabei werden auf den Sensor einfallende Photonen (Lichtteilchen) von einem Halbleiterelement absorbiert und es entstehen elektrische Ladungsträger, welche gezielt ausgelesen werden können. Grundlage dafür ist der von *Einstein* [Ein05] entdeckte photoelektrische Effekt (Abbildung 2.36).

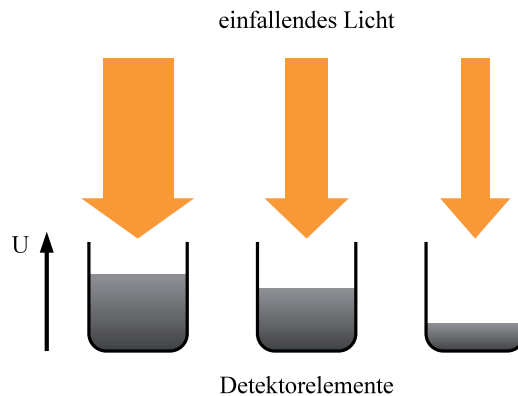


Abb. 2.36: Photoelektrischer Effekt: die einfallenden Photonen werden von einem Detektorelement absorbiert und erzeugen dadurch elektrische Ladung

Zur aktiven Beleuchtung eines Objektes lassen sich je nach Verfahren verschiedene Systeme einsetzen. Vor allem die Projektion von monochromatischem Licht durch Laserquellen sowie Beleuchtung mittels strukturiertem Licht durch Projektoren sind von besonderer Bedeutung. Punktlaser projizieren einen Punkt auf die Oberfläche, der besonders durch seine hohe Lichtleistung und durch sein enges Frequenzband gut zu detektieren ist. Durch spezielle Optiken bzw. durch Galvanometerspiegel am Laser können 1D- und 2D- Strukturen erzeugt werden, die vor allem beim Lichtschnittverfahren genutzt werden. Mittels Dia-, LCD- oder DLP-Projektoren lassen sich beliebige, auch farbige, Muster auf eine Oberfläche projizieren. Bei Dia- und LCD-Projektoren kommt eine Lichtquelle zum Einsatz, die ein Dia oder ein entsprechendes Flüssigkristalldisplay durchleuchtet. Durch geeignete Objektive wird das Licht gebündelt und auf eine Oberfläche projiziert. DLP-Projektoren [Ins05] verwenden auf Halbleiterelementen montierte Mikrospiegel (DMD *digital micromirror device*) die entsprechend der Anstellung Licht einer Lichtquelle reflektieren oder absorbieren. Diese Art von Projektoren können sehr schnell reagieren (bis zu 70 kHz [DD06]) und sind in hohen Auflösungen mit bis zu 2,3 Millionen Spiegeln [Asw12] erhältlich.

2.9 Fehlereinflüsse

Bei der Verwendung von Messsystemen zum Prüfen von Geometrieelementen ist es notwendig, Aussagen über die erreichbare Genauigkeit des Systems zu treffen. Bei komplexen Messsystemen ist aufgrund von Abhängigkeiten vieler verschiedener Parameter eine eindeutige Aussage zur erreichten Genauigkeit kaum möglich. Anhand eines Ishikawa-Diagramms (Abbildung 2.37) lassen sich die Fehlereinflussfaktoren nach WEICKMANN [Wei10] in ein sog. 5 M's-Modell einordnen. Demnach haben neben dem eigentlichen Messsystem, welches mit den Unsicherheiten aus der verwendeten Hardware (Kameras, Objektive, Projektor, mechanische Lagerung) beschrieben wird, auch übergeordnete Größen auf die Messunsicherheit Einfluss. Die Messstrategie, also die Planung der Messanordnung, die Konfiguration des Sensors (Messfeld, etc.), die verwendeten Auswertelgorithmen, das Messobjekt selbst, insbesondere seine fotometrischen Eigenschaften entscheiden über die Messunsicherheit des Gesamtsystems. Ferner spielt die Umgebung (Milieu) der Aufnahmen eine wichtige Rolle, da besonders klimatische Faktoren (Temperatur, Luftfeuchte) sowie die Beleuchtungssituation auf die Qualität der Messung einwirkt. Nicht zuletzt ist der Bediener des Systems an der Größe der Messunsicherheiten beteiligt.

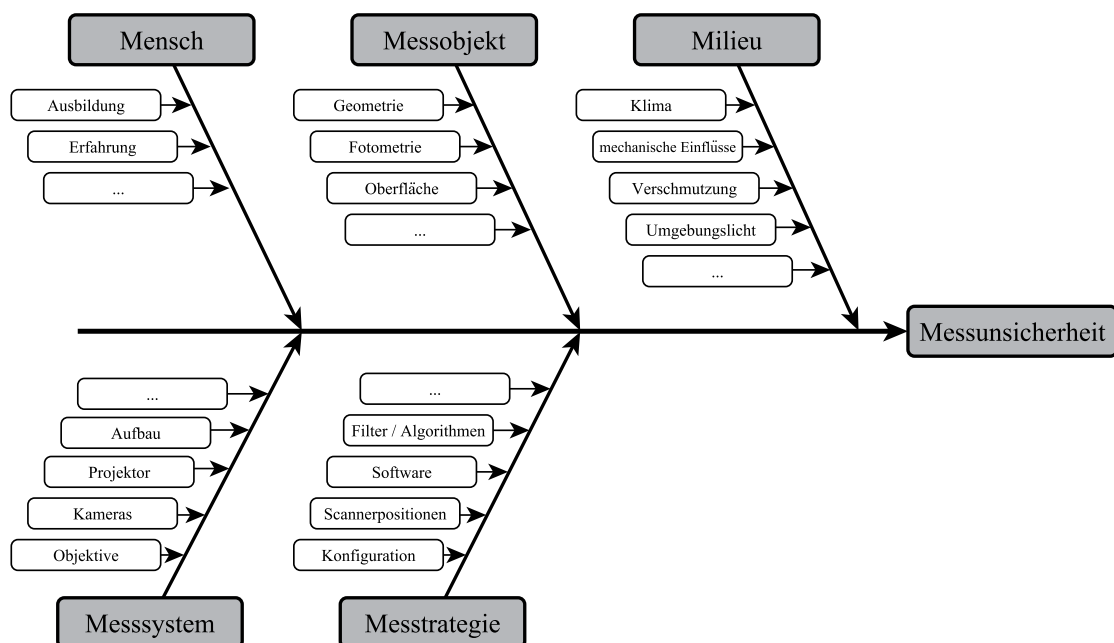


Abb. 2.37: Ishikawa-Diagramm, angelehnt an WEICKMANN in [Wei10] aufgestelltem „5 M's“-Modell zur Darstellung der Einflussgrößen auf die Messunsicherheit des Systems

2.10 Zusammenstellung der modellrelevanten Funktionen und Parameter

Für das folgende Berechnungsmodell zur Erfassungsplanung sollen ausgewählte Funktionen und Eigenschaften des Streifenprojektionsverfahrens berücksichtigt werden. Andere Faktoren bleiben dagegen unberücksichtigt bzw. werden vereinfacht.

Tab. 2.2: Zusammenstellung aller modellrelevanten Funktionen und Parameter

Funktion / Parameter	Umsetzung	Begründung
Triangulationsprinzip	indirekt	Es wird für jeden beteiligten Beobachter ein farblich codierter Flächenbereich beobachtet. Eine Bestimmung der Koordinate über den räumlichen Vorwärtsschritt erfolgt nicht.
Korrespondenzfindung / Codierung	indirekt	Es werden finite Flächenelemente farblich codiert.
Räumlicher Vorwärtsschritt	keine	Es erfolgt keine Punktbestimmung im Raum, sondern nur eine Aussage über die Sichtbarkeit des betrachteten Flächenelementes.
Geometrische Optik / Zentralprojektion	erfolgt	Es wird zur geometrischen Beschreibung der Optik das Lochkameramodell genutzt.
Scharfabbildung	indirekt	Der mögliche Schärfentiefebereich wird in der Abbildungstransformation behandelt.
Auflösung / Bildmaßstab	erfolgt	Durch Angabe der Kamerasensorgröße in Pixeln sowie der geometrischen Nachbildung der Szene wird sowohl die Auflösung als auch der Bildmaßstab berücksichtigt.
Abbildungsfehler	keine	Die Abbildungsfehler werden durch geeignete Objektivauswahl, bzw. durch Kalibrierung der Kameras und des Gesamtsystems deutlich verringert. Im Folgenden werden die beschriebenen Abbildungsfehler vernachlässigt.
Abbildungstransformation	erfolgt	Die Abbildungstransformation wird, wie beschrieben, auf der Grafikkarte berechnet.
Phase-Shift-Verfahren	keine	Die Codierung erfolgt nur im Bereich der finiten Flächenelemente.
Kalibrierung	indirekt	Das im Modell errechnete Abbild der Szene wird dem kalibrierten Aufnahmebild gleichgesetzt. Die, für die geometrische Optik relevanten Parameter werden aus dem kalibrierten Scannersystem übernommen.

Tab. 2.2: Zusammenstellung aller modellrelevanter Funktionen und Parameter (Fortsetzung)

Funktion / Parameter	Umsetzung	Begründung
Konfiguration und Messfeld	erfolgt	Die Konfiguration wird einer realen Konfiguration nachgebildet. Kamera- und Projektorposition bzw. -Orientierung werden übernommen. Das Messfeld bzw. der Bildausschnitt der realen Kameras werden im Modell nachempfunden.
Mehrbildauswertung	keine	Es werden keine Scandaten generiert. Es werden ausschließlich, die aus einer Scannerposition erfassbaren Oberflächenteile berechnet. Somit entfällt eine Registrierung.
Sensor- und Projektoreigenschaften	keine	Eine genaue technische Nachahmung von Sensor- und Projektoreigenschaften erfolgt nicht. Es wird nur ein optisches Modell verwendet.
Fotometrische Eigenschaften von Oberflächen	vereinfacht	Die zu erfassende Oberfläche wird als diffus reflektierend angenommen. Zur vereinfachten Darstellung von leicht glänzenden Objekten wird ein direkt reflektierender Lichtanteil berechnet. Die Intensität des Glanzes wird anhand eines Parameters angegeben.
Beleuchtung / Fremdlicht	vereinfacht	Die Beleuchtung durch Projektor- und Fremdlicht wird auf eine normierte Beleuchtungsintensität vereinfacht. Fremdlicht lässt sich nach Gleichung (2.49) vernachlässigen, der Projektor wird als Parallellichtquelle beschrieben.
sonst. Fehlereinflüsse	keine	Die Fehlerquellen gemäß Abschnitt 2.9 und die somit erreichbare Messunsicherheit wird nicht im Modell berücksichtigt.

3 Sichtbarkeitsberechnung

Das in den vorherigen Kapiteln beschriebene Streifenprojektionsverfahren soll nachfolgend in einem Simulationsmodell beschrieben werden. Ziel ist es, eine Berechnung der von einem Scanner erfassten Bereiche (Messpunkte) eines Objektes während einer Reihe von Einzelaufnahmen zu ermöglichen. Im Weiteren wird von Sichtbarkeitsberechnungen gesprochen. Damit ist die Bestimmung der Oberflächen des Objektes gemeint, welche vom Sensor „gesehen“ werden. Dabei werden die notwendigen geometrischen, optisch/physikalischen Eigenschaften sowie die Scannerkonfiguration eines Streifenprojektionssensors (siehe Tabelle 2.2) abgebildet.

Mit dem Hintergrund der Minimierung mehrerer Einzelaufnahmen und dem Ziel, die erfasste Oberfläche eines Objektes durch gezielte Positionierung des Scanners zu maximieren, ist es notwendig, die realen physikalischen Zusammenhänge an angebrachter Stelle zu vereinfachen um eine hohe Rechenperformance zu erhalten. Die Berechnung erfolgt weitestgehend auf der Grafikkarte (GPU - *Graphics Processing Unit*) da diese leistungsfähige Methoden hinsichtlich optischer Abbildungen aufweist. Des Weiteren lassen sich Modelle zur Beleuchtungssituation integrieren um fotometrische Eigenschaften des Materials abzubilden. Das Objekt selber kann aus einer Vielzahl oberflächenbeschreibender Polygone beschrieben werden um auch Details wie Defekte und Oberflächenelemente (z. B. Bohrungen, Nuten, enge Radien, etc.) darzustellen.

Raytracingalgorithmen kommen nachfolgend nicht zum Einsatz. Die Verfolgung von Licht- und Sehstrahlen der beteiligten Kameras ermöglichen zwar eine genaue Modellierung von Verdeckungen, Beleuchtungszuständen (Phase-Shift, Gray-Code-Beleuchtung), Reflexionen und Materialoberflächen, bedürfen aber eines hohen Rechenaufwandes. Vielmehr werden hardwarenahe Shaderprogramme verwendet, die eine schnelle Berechnung einzelner Abbildungen von dreidimensionalen Objekten ermöglichen.

3.1 Scanner-Modell

Für die Modellierung eines Streifenprojektionssensors erfolgt neben der mathematischen Beschreibung der optischen Abbildung sowie der Positionierung des Scanners auch die geometrische Beschreibung des kompletten Sensorkopfes mit dem Projektor und der verwendeten Kameras.

3.1.1 Positionierung des Sensors

Neben der Beschreibung der optischen bzw. abbildenden Eigenschaften der am System beteiligten Kameras bzw. des Projektors, ist der Aufbau des Systems entscheidend. Dabei wird die Lage und Ausrichtung der Kameras und des Projektors zueinander sowie die Lage und Ausrichtung des Scanners im Raum definiert. Gleichung (2.31) beschreibt mit den Kameravektoren im Weltkoordinatensystem (Cam-Forward \vec{c}_f , Cam-Up \vec{c}_u , Cam-Right \vec{c}_r , Kameraposition \mathbf{p}) die Position und Orientierung im Raum. Die Angabe der Kameravektoren kann unter Verwendung der äußeren bzw. extrinsischen Kameraparameter erfolgen. Diese setzt sich aus der Position der Kamera im Raum, sowie den Drehwinkeln um die Koordinatenachsen ω , φ und κ zusammen. Die Drehreihenfolge ist abhängig vom verwendeten, im Folgenden beschriebenen System.

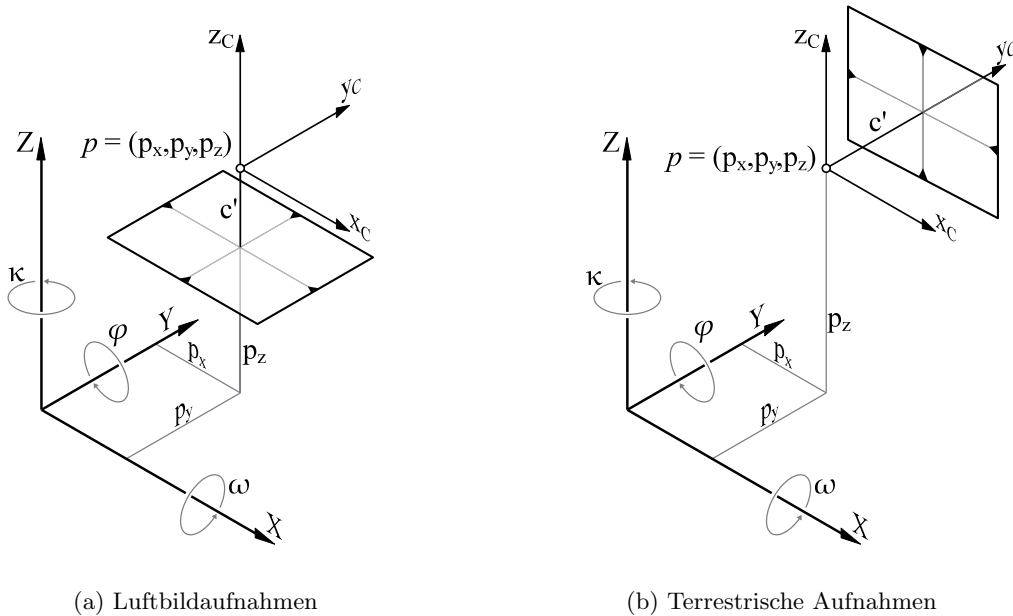


Abb. 3.1: Je nach Aufnahmesystem unterscheidet man die Reihenfolge der Rotation sowie die Definition der Kameravektoren

Abbildung 3.1 beschreibt die in der Photogrammetrie üblichen Aufnahmesysteme. Bei Luftbildaufnahmen 3.1a zeigt die Aufnahmerichtung entgegen der Z -Achse und es erfolgt die Rotation erst um die Z -Achse des Weltkoordinatensystems um den Winkel κ , dann um Y (Winkel φ) und abschliessend um die X -Achse (Winkel ω). Die entsprechende Rotation ist mit der Gleichung (3.1) dargestellt.

$$\mathbf{R}_{aero} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\kappa \quad (3.1)$$

Bei terrestrischen Aufnahmen (Abbildung 3.1b) wird eine andere Rotationsreihenfolge verwendet. Diese resultiert auf die entsprechend eingesetzten geodätischen Winkelmessopera-

turen [Luh10b]. Dabei beschreibt die Y-Achse die Blickrichtung der Kamera. Die Rotation erfolgt zuerst um die Y-Achse, danach um die Z-Achse und abschliessend um die X-Achse (Gleichung (3.2)).

$$\mathbf{R}_{terra} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\varphi \quad (3.2)$$

Für die Beschreibung der Streifenprojektionssensoren soll die Transformation für terrestrische Aufnahmen verwendet werden. Dabei sind die Kameravektoren im Kamerakoordinatensystem wie folgt definiert:

$$\vec{\mathbf{cf}}_{terra} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{\mathbf{cu}}_{terra} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{\mathbf{cr}}_{terra} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Unter Angabe der Drehwinkel ω , φ und κ so wie der Kameraposition \mathbf{cp} kann die Transformationsmatrix \mathbf{T}_{Cam} für die Berechnung der Kameravektoren in ein übergeordnetes Koordinatensystem aufgestellt werden:

$$\mathbf{T}_{Cam}(\mathbf{R}_{terra}, \mathbf{cp}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{terra} & \mathbf{cp} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{T}_{Cam}(\omega, \varphi, \kappa, \mathbf{cp}) = \mathbf{T}_{Cam}(\mathbf{R}_{terra}, \mathbf{cp}) = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi - \sin \kappa \sin \omega \sin \varphi & -\sin \kappa \cos \omega & \cos \kappa \sin \varphi + \sin \kappa \sin \omega \cos \varphi & \mathbf{cp}_x \\ \sin \kappa \cos \varphi + \cos \kappa \sin \omega \sin \varphi & \cos \kappa \cos \omega & \sin \kappa \sin \varphi - \cos \kappa \sin \omega \cos \varphi & \mathbf{cp}_y \\ -\cos \omega \sin \varphi & \sin \omega & \cos \omega \cos \varphi & \mathbf{cp}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ein Streifenprojektionssensor besteht aus einer Anzahl von N Kameras und i. d. R. einem Projektor.

Unter Angabe der entsprechenden Positionen und Orientierungen im Bezugssystem (Bezugssystem Scanner $[]^S$) können für die beteiligten Kameras und für den Projektor entsprechende Transformationsmatrizen ($\mathbf{T}_{Cam i}$ und \mathbf{T}_{Proj}) aufgestellt werden. Der komplette Scankopf (\mathbf{T}_{Scan}) kann ebenfalls mit einer Matrix im Raum (Bezugssystem Welt $[]^W$) definiert werden:

$$\mathbf{T}_{Cam i} = \mathbf{T}_{Cam}(\omega_i^S, \varphi_i^S, \kappa_i^S, \mathbf{cp}_i^S) \quad \text{wobei: } i = [1 \dots N] \quad (3.5)$$

$$\mathbf{T}_{Proj} = \mathbf{T}_{Cam}(\omega_{Proj}^S, \varphi_{Proj}^S, \kappa_{Proj}^S, \mathbf{cp}_{Proj}^S)$$

$$\mathbf{T}_{Scan} = \mathbf{T}_{Cam}(\omega_{Scan}^W, \varphi_{Scan}^W, \kappa_{Scan}^W, \mathbf{cp}_{Scan}^W)$$

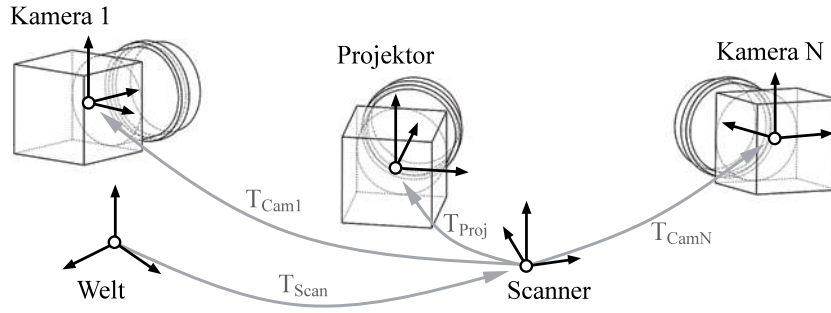


Abb. 3.2: Transformationskette eines Punktes aus dem Weltkoordinatensystem in das entsprechende Kamerakoordinatensystem

Die Transformationsabhängigkeiten sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Zu sehen sind sowohl die Bezugskoordinatensysteme der einzelnen optischen Elemente, das des gesamten Scanners sowie das der Welt. Die Lage der zwei verbauten Kameras wird mit \mathbf{T}_{Cam1} bzw. mit \mathbf{T}_{Cam2} beschrieben, die Position des Projektors mit \mathbf{T}_{Proj} . Die Angaben beziehen die auf einen gemeinsamen Ursprung (Scanner-Koordinatensystem). Der Scankopf selbst wird mit \mathbf{T}_{Scan} in der Welt ausgerichtet.

Um alle Kameravektoren vom Kamera- in das Weltkoordinatensystem zu transformieren, können die Matrizen zur Gesamttransformation $\mathbf{T}_{CamtoWorld}$ multipliziert werden. In Gleichung (3.6) ist die Transformation für eine Kamera i dargestellt.

$$\mathbf{T}_{CamtoWorld} = \mathbf{T}_{Scan} \mathbf{T}_{Cam i} \quad (3.6)$$

Daraus ergibt sich die endgültige Transformation der Kameravektoren im terrestrischen Aufnahmesystem \vec{cf}_{terra} , \vec{cu}_{terra} und \vec{cr}_{terra} aus Gleichung (3.3):

$$\vec{cf} = \mathbf{T}_{CamtoWorld} \vec{cf}_{terra} \quad \vec{cu} = \mathbf{T}_{CamtoWorld} \vec{cu}_{terra} \quad \vec{cr} = \mathbf{T}_{CamtoWorld} \vec{cr}_{terra} \quad (3.7)$$

Die Kameraposition \mathbf{cp}_{Welt} im Weltkoordinatensystem erfolgt durch die Transformation des Projektionszentrums der entsprechenden Kamera (3.8). Dieses liegt in der Regel im Ursprung des Kamerakoordinatensystems.

$$\mathbf{cp}_{Welt} = \mathbf{T}_{CamtoWorld} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.1.2 Berechnung der Abbildung eines Objektes

Die im vorherigen Abschnitt definierte Kameraorientierung, dargestellt durch die Vektoren \vec{cf} , \vec{cu} und \vec{cr} sowie der Position der Kamera \mathbf{cp}_{Welt} im Weltkoordinatensystem, lässt sich die Positionsmatrix \mathbf{P}_K und daraus resultierend die Projektionsmatrix $\mathbf{P}_{Project}$ analog Gleichung (2.36) im Abschnitt 2.5.1 aufstellen. Mit der Gleichung

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}_{Project} \mathbf{x} \quad (3.9)$$

kann für jeden Objektpunkt \mathbf{x} der resultierende Bildpunkt \mathbf{x}' im entsprechenden Kamerabild errechnet werden.

Es lässt sich also festhalten, dass ein dreidimensionales Objekt durch die oben angeführten Gleichungen in eine Bildebene eines Beobachters transformiert werden kann. Bleibt die Geometrie der einzelnen Beobachter (Kameras und Projektoren) im Sensorkopf fixiert, ergibt sich sowohl die Transformation abhängig von der Position des Sensors im Raum \mathbf{cp}_{Scan} im globalem Koordinatensystem (Welt) als auch durch seine Ausrichtungen ω , φ und κ . Die Abbildungsberechnung erfolgt durch die Grafikkarte (Abschnitt 2.5.2).

3.1.3 Konfiguration des Sensors

Nachfolgend sind alle einstellbaren optischen und geometrischen Parameter für ein allgemeines Streifenprojektionssystem zusammengefasst (siehe Tabelle 3.1). Diese unterscheiden sich in fixe Parameter (Kategorie A), welche sich, nachdem sie einmal ausgewählt sind, zur Lebenszeit eines Streifenprojektionssensors nicht ändern. Das sind im verwendeten Modell die Kameraparameter wie Breite W und Höhe H des CCD-Chips in Pixel (siehe Gleichungen (2.37) und (2.38)) als auch die Parameter des terrestrischen Projektionssystems im Kamerakoordinatensystem (\vec{cf}_{terra} , \vec{cu}_{terra} und \vec{cr}_{terra}).

Die nächste Gruppe von Parametern (Kategorie B) sind jene, die sich nach einer Kalibrierung eines Messfeldes konstant verhalten. Das sind die Brennweite des Objektivs und die damit verbundenen Öffnungswinkel θ_h und θ_v des Sichtvolumens (siehe Gleichung (2.33) und Abbildung 2.16b). Weiterhin ist die Position des Projektors sowie der Kameras (\mathbf{T}_{Proj} und $\mathbf{T}_{Cam i}$) innerhalb des Sensorkopfes mit der Kalibrierung definiert. Als variable Parameter (Kategorie C) gelten im Modell die Position und Orientierung des Sensorkopfes.

Am Markt befinden sich eine Vielzahl unterschiedlicher Streifenprojektionsscanner. Viele Systeme nutzen einen Projektor und eine bzw. zwei Kameras. So ist der *zSnapper* der Firma Via-lux mit einer Kamera sowie einem Projektor ausgestattet. Die Firma Gom nutzt i. d. R. zwei Kameras und eine Projektionseinheit, wobei bei älteren Systemen nur die Kameras kalibriert waren. Moderne Systeme unter dem Markennamen *Triple Scan* kalibrieren sowohl Projektor

Tab. 3.1: Verwendete Parameter zur Abbildungsberechnung einer einzelnen Sensoraufnahme. Die Kategorien beschreiben mit **A** die zur Lebenszeit des Scanners fixierten Modellparameter, Kategorie **B** beschreibt die nach der Kalibrierung fixierten Parameter und **C** die Parameter, welche sich innerhalb eines Erfassungsplanes ändern.

Kategorie	Variable	Beschreibung
A ¹	W	Breite des Bildsensors in Pixel
	H	Höhe des Bildsensors in Pixel
B ²	θ_h	Horizontaler Öffnungswinkel. Dieser wird aus der eingestellten Brennweite errechnet. (θ_v kann über das Ansichts- bzw. Pixelverhältniss der Bildfläche bestimmt werden)
	$near$	Abstand vom Projektionszentrum zur vorderen Ebene des scharf gestellten Bereiches der Abbildung
	far	Abstand vom Projektionszentrum zur hinteren Ebene des scharf gestellten Bereiches der Abbildung
	\mathbf{cp}_i^S	Position des Brennpunktes im Scannerkoordinatensystem
	ω_i^S	Drehwinkel ω im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Sensorkoordinatensystem
	φ_i^S	Drehwinkel φ im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Sensorkoordinatensystem
C ³	κ_i^S	Drehwinkel κ im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Sensorkoordinatensystem
	\mathbf{cp}_{Scan}^W	Position des Sensors im Weltkoordinatensystem
	ω_{Scan}^W	Drehwinkel ω im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Weltkoordinatensystem
	φ_{Scan}^W	Drehwinkel φ im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Weltkoordinatensystem
	κ_{Scan}^W	Drehwinkel κ im terrestrischen Aufnahmesystem bezogen auf das Weltkoordinatensystem

¹ zur Lebenszeit des Scanners fixierte Parameter⁴

² mit der Kalibrierung des Scanners fixierte Parameter⁴ einer Kamera bzw. eines Projektors (Index i)

³ während des Scannens variable Parameter⁴

⁴ Es werden nur die im Berechnungsmodell verwendeten Parameter dargestellt.

als auch beide Kameras. Dabei ist der Projektor mittig zwischen den Kameras positioniert. Die Firma Breuckmann (AICON GmbH) nutzt ebenfalls kalibrierte Projektoren und Kameras, ordnet diese aber asymmetrisch um den Projektor an. Bei allen Sensoren werden die Auflösungen der Kameras sowie der digitalen Projektoren angegeben. Verschiedene Messfelder werden durch Änderung der Objektive, fakultativ durch die Änderung der Abstände zwischen den Optiken erreicht. Die in Tabelle 3.1 erforderlichen Parameter der Kategorie A und B lassen sich aus Produktdatenblättern sowie den Kalibrierdaten entnehmen.

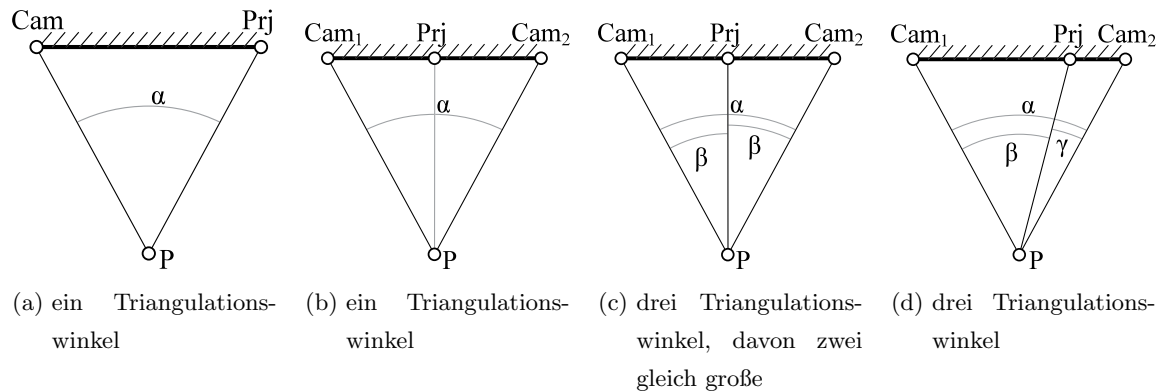


Abb. 3.3: Messfeldkonfiguration gängiger Streifenprojektionssysteme. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Kameras **Cam** sowie der Anordnung der Projektoren **Prj**. Als Messfeldmitte ist jeweils der Zielpunkt **T** abgebildet. Die Triangulationswinkel werden mit α , β und γ bezeichnet.

3.2 Werkstückgeometrie

Für die Sichtbarkeitsberechnung ist die genaue Geometrie der zu erfassenden Szene notwendig. Dabei spielt sowohl das eigentlich zu erfassende Objekt, als auch Objekte in unmittelbarer Umgebung eine Rolle. So können z. B. Einspannvorrichtungen das Objekt in einer Kameraansicht verdecken oder das projizierte Licht des Projektors abschatten. Das hat zur Folge, dass keine Koordinaten auf der Oberfläche des Objektes bestimmt werden können.

Die Geometrien der Objekte können aus verschiedenen Datenquellen gewonnen werden. Zum einen sind das native dreidimensionale CAD-Daten, welche während der rechnergestützten Konstruktion der Objekte entstehen. CAD-Daten beschreiben die Geometrie eines Objektes durch analytische Flächenbeschreibungen wie Ebenen, Kugeln oder Splineflächen. Durch Verschneidung der Teilflächen entsteht die Bauteilgeometrie.

Zum anderen können Oberflächen mit diskreten Koordinaten beschrieben werden. Im einfachsten Fall ist das eine Punktwolke, die die Objektoberfläche abbildet. Zwischen den einzelnen Punkten existiert keine Information über die Fläche, ferner liefern reine Punktkoordinaten keine Angabe darüber, in welcher Richtung das Objektinnere liegt. Durch eine Verbindung der einzelnen Punkte zu Polygonen wird eine diskrete, sowie flächenhafte Beschreibung der Oberfläche möglich. Im einfachsten Fall geschieht dies durch die Triangulation der Punkte zu Dreiecksnetzen. Damit kann eine konsistente Objektoberfläche erzeugt werden, welche auch Angaben über die Flächenorientierung ermöglicht. Die Koordinateninterpolation zwischen den gegebenen Messpunkten, also auf einer Polygonfläche, erfolgt i. d. R. linear zwischen den Eckpunkten eines Polygons.

Eine weitere Form diskreter Geometriebeschreibung ist die Darstellung des Objektes in Volumendaten. Dabei wird einem räumlichen Bereich (Voxel) eine entsprechende Intensität zu-

geordnet. Ein komplettes Objekt wird aus einer Vielzahl Voxel dargestellt. Die jeweilige Intensität eines Voxel resultiert bei Röntgentomographen aus der unterschiedlichen Röntgenabsorption eines Materials [CN12]. Bei entsprechender Angabe von Referenzintensitäten kann sowohl die innere als auch die äußere Oberfläche (Grenzfläche) eines Objektes bestimmt werden.

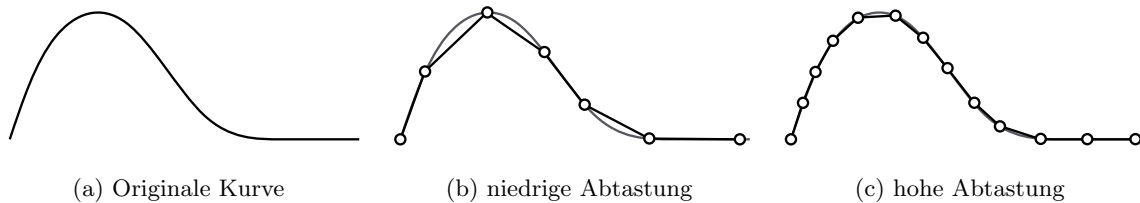


Abb. 3.4: Diskretisierung einer Kurve durch diskrete Punkte. Dabei liegen die Punkte exakt auf der Kurve. Zwischen den Punkten wurde linear interpoliert. Abbildung 3.4a zeigt die originale Kurve, während Abbildung 3.4b und 3.4c eine niedrige bzw. hohe Diskretisierungsdichte darstellen.

Diskrete Daten können unterschiedlich fein aufgelöst sein. Das bedeutet, dass die Anzahl an Messpunkten, bzw. Polygonen pro Flächenausschnitt variiert. Höher aufgelöste Daten (hohe Anzahl an Punkten pro Fläche) erlauben eine feinere Beschreibung der Fläche (Abbildung 3.4 zeigt die Diskretisierung einer Kurve anhand von Punkten und Linien), mit der Folge eines höheren Datenvolumens aber geringerer Abweichung bei der Interpolation zwischen den Datenpunkten zur originalen Objektoberfläche. Die Auflösung kann sich über der Oberfläche des Originals ändern. Ebene Bereiche benötigen wenige Punkte bzw. Polygone zur Abbildung. Gekrümmte Flächenbereiche benötigen, je nach geforderter Genauigkeit eine höhere Auflösung. Des Weiteren zeigt Abbildung 3.4b, dass obwohl die Punkte exakt auf der Oberfläche liegen, es bei stark gekrümmten Bereichen zu einem größeren Sehnenfehler kommen kann.

Zur nachfolgenden Sichtbarkeitsberechnung sind oberflächenbeschreibende Dreiecke zielführend!

Deshalb müssen die einzelnen Oberflächenrepräsentationen zu Dreiecksnetzen umgewandelt werden. Die Umwandlung von CAD zu Polygonnetzen geschieht durch die Berechnung einzelner Oberflächenpunkte, welche zu Polygonen verbunden werden. Polygone mit mehr als drei Eckpunkten lassen sich in Dreiecke aufteilen. Die meisten CAD-Programme liefern diese Funktion (z. B. über den Export in eine Dreiecksnetzdatei, beispielsweise ins STL-Format), bei der i. d. R. keine Nacharbeit für ein konsistentes Dreiecksnetz nötig ist. Das entstehende Netz ist, je nach Oberflächenstruktur (Ebene, Kurven, etc.) verschieden fein aufgelöst. Ferner ist auch die Generierung eines gleichmäßigen Dreiecksnetzes möglich. In Abbildung 3.5

ist eine Flanschscheibe in verschiedener Geometrierepräsentation zu sehen. Ausgehend vom CAD-Modell (Abbildung 3.5a) ist ein abgeleitetes Dreiecksnetz¹ (Abbildung 3.5b) zu sehen, welches, je nach Krümmung der Oberfläche, verschieden fein diskretisiert ist. Speziellere Softwareprodukte aus dem Reverse Engineering Bereich z. B. *Geomagic Studio* (3DSystems) ermöglichen die Generierung homogener Dreiecksnetze aus CAD-Daten (Abbildung 3.5c). Dabei ist eine gleichmäßige Diskretisierung über die komplette Objektoberfläche erreichbar.

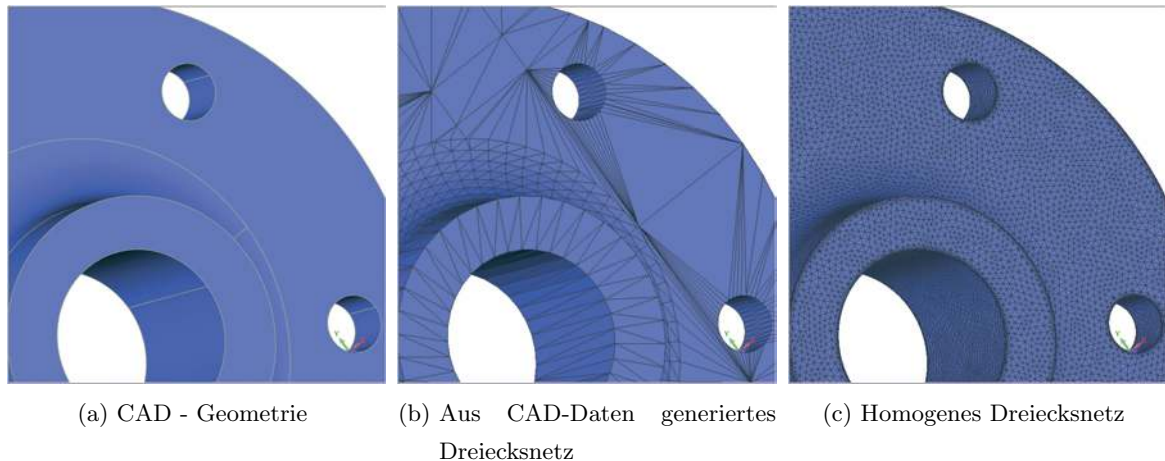


Abb. 3.5: In den Abbildungen 3.5a bis 3.5c sind verschiedene ausgewählte Datenrepräsentation eines Flansches dargestellt.

3.3 Berechnung der Sichtbarkeit einer Einzelaufnahme

Zur schnellen Berechnung der eigentlichen Sichtbarkeit soll die Grafikkarte mit der Möglichkeit, den Renderprozess durch die Verwendung von Shaderprogrammen zu modifizieren, genutzt werden. Die positionierte Szene mit dem zu erfassenden Objekt sowie die im Umfeld befindlichen Elemente (z. B. Einspannungen) werden von jeder beteiligten Kamera bzw. dem Projektor beobachtet (Abbildung 3.6). Für jeden Beobachter wird bestimmt, welcher Oberflächenteil zu sehen ist, bzw. auf welchen Teil das Lichtmuster projiziert wird. Anhand der einzelnen Aussagen zur Sichtbarkeit des Objektes im Beobachter werden die gesehenen Bereiche der kompletten Einzelaufnahme errechnet (vgl. nachfolgend Abschnitt 3.3.5).

Zur Berücksichtigung der Verdeckungssituationen erfolgt eine genaue geometrische Beschreibung der Objekte in der Szene mit einem hinreichend hohen Detailreichtum. Des Weiteren müssen die vorhandenen Beleuchtungssituationen nachempfunden werden. Dazu zählt das Reflexionsverhalten des Objektes auf die Beleuchtung durch den Projektor (siehe Abschnitt 2.7.2) sowie die Einflüsse der jeweiligen Objektivkonstruktion, welche zur Vignettierung als

¹Erstellt mit Exportfunktion von *Solid Works* (Dassault Systemes)

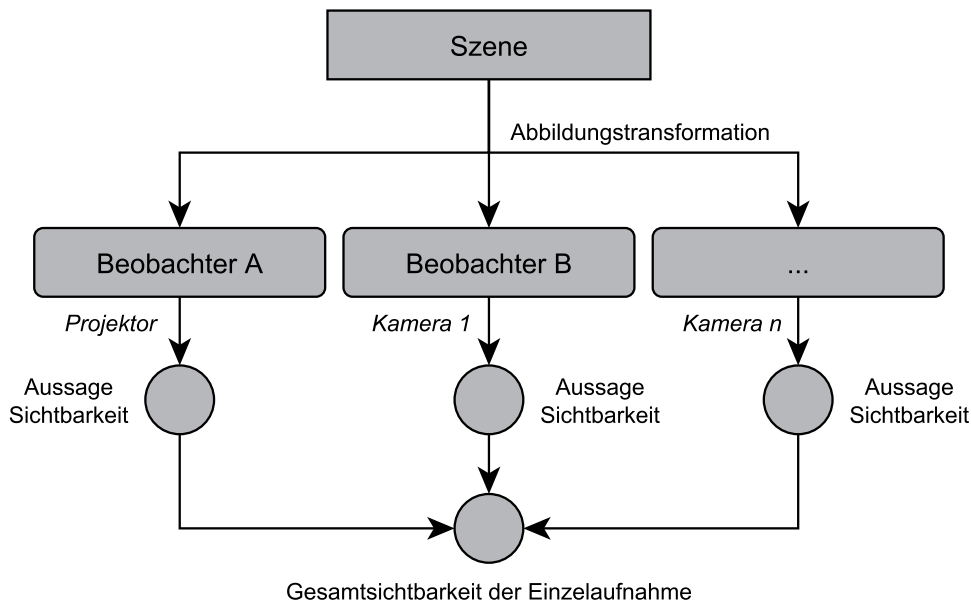


Abb. 3.6: Prinzip zur Berechnung einer Einzelaufnahme. Eine Szene wird von Projektor und einer Anzahl n Kameras beobachtet. Für jeden Beobachter wird die Sichtbarkeit aus dieser Perspektive bestimmt. Abschliessend erfolgt die Berechnung der Gesamtsichtbarkeit und somit die Aussage über erfasste Bereiche.

auch zum Randlichtabfall führen (siehe Abschnitt 2.4). Ferner müssen die Schärfentiefe einer Kamera (Abschnitt 2.3.3) sowie die Kameraparameter wie Sensorgröße und Öffnungswinkel (Abschnitt 2.5) in die Berechnung einfließen. Abbildungsfehler, die durch Kalibrierung des Systems heraus gerechnet (z. B. Verzeichnungen) oder durch Verwendung spezieller Optiken bzw. Filter vermieden werden (z. B. Aberrationen o. Fremdluchteinflüsse), finden keinen Einfluss auf die Berechnung. Für die Gesamtaussage zur Sichtbarkeit wird die Scannerkonfiguration mit den jeweiligen Projektor- und Kameraorientierungen sowie die Lage des Sensors selber über dem Objekt berücksichtigt.

3.3.1 Datenrepräsentation und Finite Flächenelemente

Das Prinzip der Berechnung beruht darauf, die Oberfläche eines Objektes in finite Flächenelemente zu zerlegen. Diese werden aus verschiedenen Perspektiven (Scannerkameras, Projektor) beobachtet und identifiziert. Anschließend wird, je nach Scannerkonfiguration geprüft, ob ein Flächenelement vom Projektor beleuchtet und von einer oder mehreren Kameras gesehen wurde. Damit entsteht eine Aussage darüber, ob ein Flächenelemente mit dieser Sensorposition erfasst wird.

Zur Repräsentation der Objekte kommen Dreiecksnetze zum Einsatz, wobei die Dreiecke selbst die erforderlichen finiten Flächenelemente darstellen. Die Übergabe der Dreiecke erfolgt in Form einer Liste, wobei der Index in der Liste dem entsprechenden Code des Drei-

eckelementes entspricht. Verdeckungselemente oder nicht relevante Bereiche eines Objektes erhalten eine separate Codierung.

Abbildung 3.7 zeigt einen Sensorkopf, welcher mit einem Projektor **Prj** und einer Kamera **Cam** bestückt ist. Ebenfalls dargestellt ist ein beliebiges Finites Flächenelement des Objektes mit einem darin befindlichen Objektpunkt **P**. Sowohl Projektor als auch Kamera schauen auf diesen Objektpunkt (dargestellt durch Sehstrahlen), wobei der Sehstrahl des Projektors durch ein Verdeckungsobjekt behindert wird. Somit kann nicht in jedem Beobachter (im Beispiel der Projektor) das Element detektiert werden, was zur Folge hat, dass der Punkt nicht beleuchtet wird und somit keine 3D-Koordinaten errechnet werden.

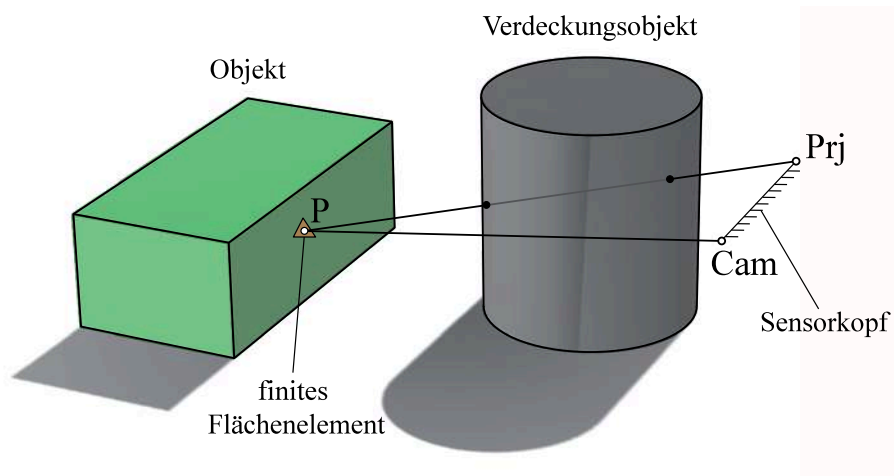


Abb. 3.7: Sehstrahl ausgehend vom Sensorkopf (**Cam**..Kamera; **Prj**..Projektor) zum, im finiten Flächenelement liegenden, Objektpunkt **P**.

Die Größe der finiten Flächenelemente muss dem Abbildungsmaßstab der Kamerasensoren angepasst werden. Sind die Elemente zu klein, können im Auflösungsbereich eines Pixels mehrere Elemente liegen, wobei aber nur eines detektiert werden kann. Bei zu groß gewählter Elementgröße sinkt der Detailgrad bei der Aussage zur Sichtbarkeit. Der Bildmaßstab M_b lässt sich bei mittlerer Aufnahmeentfernung h^* (vgl. Abschnitt 2.3.5) mit dem dabei erfassten Bildausschnitt bezogen auf die Anzahl der Pixel errechnen. Um finite Elemente sicher zu erkennen, welche schräg zur Aufnahmerichtung liegen (vgl. Abb. 2.16), wird der Betrag um einen winkelabhängigen Faktor (Winkel γ) erhöht. Somit ergibt sich eine mögliche Größe l_{fin} für die finiten Flächenelemente entsprechend der Gleichung (3.10):

$$l_{fin} = M_b \cdot \frac{1}{\cos(\gamma)} \quad (3.10)$$

Am Beispiel der Dreiecke in der Verwendung als finite Flächenelemente kann der Wert l_{fin} als die durchschnittlichen Kantenlänge in einem homogenen Dreiecksnetz interpretiert werden.

3.3.2 Codierung finiter Flächenelemente

Die benannte Codierung der finiten Flächenelemente erfolgt durch eine spezifische Farbe. Dies ist von Vorteil, da die Farben im gerenderten Abbild der Szene für jede Kameraperspektive direkt ausgelesen werden können. Diese Form der Codierung wird häufig in der Computergrafik verwendet, um Elemente eindeutig im gerenderten Abbild zu selektieren. Bekannte Verfahren sind z. B. das *Semantic Pointing* [BGBL04, EF08] oder die Verwendung von Koordinaten- bzw. Pickingbuffern.

Die Berechnung der Farbe, repräsentiert durch vier Farbkanäle mit je 256 Intensitäten, erfolgt durch die Zerlegung des jeweiligen Dreiecks-Indizes in Form eines Integers² in ein Byte³-Array, wobei jedem Byte eine Farbintensität Rot, Grün, Blau und Alpha (Durchsichtigkeit oder Transparenz) zugeordnet wird. Am Beispiel der Dreiecks-ID 105873 erfolgt die Bestimmung der entsprechenden Farbe über deren Binärdarstellung:

$$\begin{array}{lcl}
 \text{ID als Integer:} & & 105873 \\
 \text{ID als Binärdarstellung:} & \underbrace{00000000}_{\text{Alpha}} & \underbrace{00000001}_{\text{Blau}} \underbrace{10011101}_{\text{Grün}} \underbrace{10010001}_{\text{Rot}}
 \end{array}$$

und der daraus resultierenden Auswertung der Farbkanäle:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Rot} = 145 & \text{Grün} = 157 \\
 \text{Blau} = 1 & \text{Alpha} = 0
 \end{array}$$

Abbildung 3.8 zeigt fünf Dreiecke verschiedener Indizes und deren Codierung durch eine Farbe. Zwar ist der Wertebereich der codierbaren Indizes nicht unendlich groß (maximal $3.13 \cdot 10^{22}$), jedoch für die zu erreichende Anwendung mit einer Objektdarstellung mit bis zu mehreren Millionen Dreiecken ausreichend.

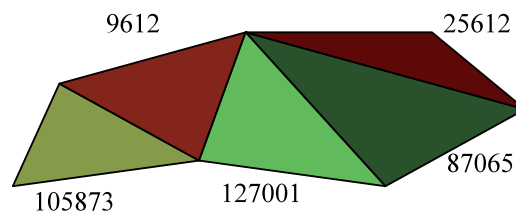


Abb. 3.8: Gemäß eigener Dreiecks-ID farbcodierte Dreiecke

²Ganzzahliger Datentyp in der Informatik, Größe 32 Bit

³Datentyp, Größe 8 Bit

3.3.3 Berücksichtigung der Beleuchtungssituation

Für jedes gerenderte finite Flächenelement soll die Beleuchtungssituation und damit die Möglichkeit der Codierung beim Streifenprojektionsverfahren durch die genannten Streifen- und Phase-Shift-Sequenzen (Abschnitt *Codierung*, Seite 34, und *Phase-Shift-Verfahren*, Seite 35), simuliert werden. Wie bereits beschrieben, erfolgt die Codierung zur Lösung des Korrespondenzproblems (Abschnitt *Korrespondenzproblem und Codierung*, Seite 13) bei Streifenprojektionssensoren über die zeitliche Codierung durch Lichtmuster (Streifen). Zur fehlerfreien Detektion des Lichtmusters ist es notwendig, dass die beleuchteten Bereiche in der Beobachterkamera nicht unter- oder überbelichten. Ferner sollte der Hell-Dunkel-Kontrast erkennbar sein. In Abbildung 2.34 auf Seite 46 ist eine quantitative Lichtbilanz eines Sensor-Projektor-Systems dargestellt, welche erläutert, aus welchen Lichtmengen das in der Kamera auftreffende Licht zusammengesetzt ist. Erfahrungsgemäß spielt hauptsächlich, die vom Projektor direkt auf das Objekt emittierte Lichtmenge eine Rolle. Entscheidend dabei ist, wie stark das auftreffende Licht diffus und gerichtet zum Beobachter hin reflektiert wird (siehe Abschnitt *Fotometrische Eigenschaften von Oberflächen*, Seite 43).

Zur Berechnung der Lichtintensitäten, welche im Beobachter pro Bildpunkt empfangen werden, soll ein für die Computergraphik entwickeltes Beleuchtungsmodell verwendet werden. Bei Beleuchtungsmodellen unterscheidet man zwischen globalen und lokalen Beleuchtungsmodellen. Globale Modelle berechnen die Lichtausbreitung unter Berücksichtigung der kompletten Szene von Objekten sowie deren fotometrischen Eigenschaften und kommen hier nicht zum Einsatz. Vielmehr soll die Lichtberechnung für jedes Fragment einer Oberfläche lokal unter Berücksichtigung von Material- und Geometrieeigenschaften erfolgen. Gängige lokale Beleuchtungsmodelle sind z. B. das Phong-Beleuchtungsmodell [Pho75], welches schnell berechenbar aber nicht physikalisch validiert ist, oder das Torrance-Sparrow-Beleuchtungsmodell (Cook-Torrance-Beleuchtungsmodell) [CT81]), welches physikalisch plausibel ist und auch Brechungseffekte berücksichtigt.

Die von einem Oberflächenfragment in Richtung des Beobachters ausgesendete Lichtmenge ist unter Beachtung des Energieerhaltungssatzes, die Summe aus emittierter, absorbierter und reflektierter Lichtmenge [Kaj86, PH04]. Im Anwendungsfall werden passive Oberflächen betrachtet, weshalb der Anteil an emittierter Lichtmenge gleich 0 ist.

Der reflektierte Anteil setzt sich aus der Reflexion aller auf den Objektpunkt eintreffender Lichtmengen zusammen. Dieser Reflexionsanteil lässt sich mit der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (*Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF*) ausdrücken, welche allgemein die Beziehung von bestrahlter zu reflektierter Lichtmenge darstellt (Gleichung (3.11)). Diese ist im Wesentlichen abhängig von den Winkeln zwischen Beobachterrichtung \vec{V} und der des einfallenden Lichtes \vec{L} zur Flächennormalen des betrachteten Objektpunktes [Nic65] und gilt i. d. R. für einen engen Wellenlängenbereich λ .

$$BRDF(\vec{V}, \vec{L})_\lambda = \frac{I_{ab}}{I_{an}} \quad (3.11)$$

Des Weiteren können Parameter das fotometrische Verhalten (Material) einer Oberfläche definieren, wobei zwischen isotropem und anisotropem Material unterschieden wird. Bei anisotropem Material ist die Reflexion abhängig von der Materialorientierung in Bezug auf Blick- und Lichtrichtungsvektor und führt zur richtungsabhängigen Reflexion. Reflexionsisotropie tritt in diesem Zusammenhang z. B. bei gefrästem oder gebürstetem Metall auf (Abbildung 3.9).

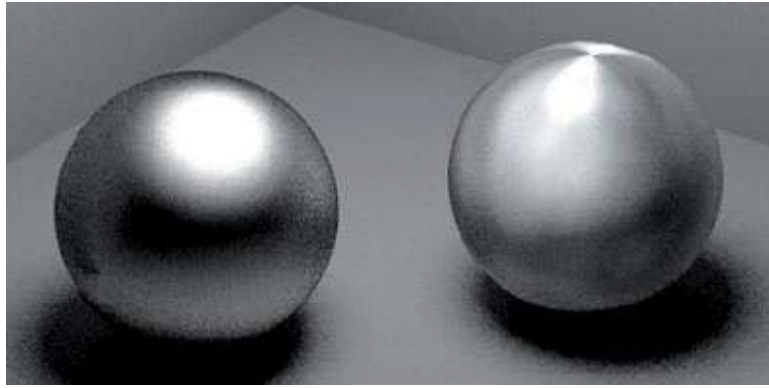


Abb. 3.9: Reflexionsverhalten isotroper (linke Kugel) und anisotroper Materialdefinition (rechte Kugel) [Mar14]

Ferner gilt für ein physikalisch plausibles Modell, dass die reflektierte Lichtintensität in Richtung des Betrachters, beim Vertauschen von Licht- und Beobachterposition, gleich groß ist (es gilt die sog. *Helmholz-Reziprozität*, [PH04], Gleichung (3.12)).

$$BRDF(\vec{V}, \vec{L})_\lambda = BRDF(\vec{L}, \vec{V})_\lambda \quad (3.12)$$

Die Ausführung eines BRDF- Modells kann je nach Material, der zu erreichenden Abbildungsqualität, der verfügbaren Rechenleistung oder anderer Randbedingungen angepasst werden. Weiter kann die Beschreibung des reflektierenden Lichtes durch einen umgebenden (*ambient*, Faktor a), diffusen (R_{diff}) und einen glänzenden (R_{spec} , *specular*) Anteil getrennt beschrieben und mittels Superpositionsprinzip aufsummiert werden [Pho75, CT81]. Es gilt Gleichung (3.13) wobei meist $s + d + a = 1$ ist.

$$BRDF(\vec{V}, \vec{L})_\lambda = s R_{spec}(\vec{V}, \vec{L}) + d R_{diff}(\vec{V}, \vec{L}) + a \quad (3.13)$$

Die Aufstellung eines BRDF-Modells kann durch die Beschreibung mit physikalisch interpretierbaren Parametern erfolgen (z. B. das He-Beleuchtungsmodell [HTSG91]). Diese lassen

Das verwendete Berechnungsmodell nutzt einen empirischen Ansatz, da vorzugsweise eine quantitative Aussage zur Beleuchtungssituation getroffen werden soll. Schwerpunktmäßig geht es um die Beschreibung der Projektorlichtreflexionen bei verschiedenen, weiß mattierten Materialien. Eine fotorealistische Darstellung eines Objektes ist nicht das Ziel. Verwendet wird ein an das Phong-Blinn Beleuchtungsmodell [Bli77] angelehntes lokales Reflexionsmodell. Dieses ist nicht physikalisch plausibel, genügt aber für eine einfache Berechnung von über- bzw. unterbelichteten Bereichen im Kamerabild.

Die zum Aufstellen der Reflektanzfunktion notwendige Geometrie ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Ausgehend von einem Objektpunkt \mathbf{P} mit der Flächennormale \vec{n} kann der Lichtrichtungsvektor \vec{L} in Richtung der Lichtquelle \mathbf{L} , sowie der Blickrichtungsvektor \vec{V} zum Projektionszentrum \mathbf{O} aufgestellt werden. Betrachtet wird der Objektpunkt \mathbf{P} , welcher bei einem bestimmten Fragment des zu berechnenden Kamerabildes beobachtet wird. Die Orientierung der Kamera (\vec{cf} , Blickrichtungsvektor der Kamera) wird durch die Achse $\overline{\mathbf{OT}}$, die Ausrichtung des Projektors (\vec{pf}) durch die Achse $\overline{\mathbf{LT}}$ beschrieben.



Die am Objektpunkt eintreffende Lichtintensität entspricht, mit den oben genannten Einschränkungen des Projektorlichtes, an jeder Stelle der Objektoberfläche einer normierte Menge mit dem Betrag $I_{an} = 1$ (3.14) multipliziert mit einem Faktor t , welcher abhängig von der Entfernung zwischen Objektpunkt und Lichtquelle $\overline{\mathbf{PL}}$ ist.

$$I_{an} = I_{norm} t(\overline{\mathbf{PL}}) \quad (3.14)$$

Die Berechnung der reflektierten Lichtintensität I_{ab} in Bezug auf die eingehende Lichtintensität I_{an} erfolgt durch Umstellen der Gleichung (3.11) zu (3.15). Damit kann für ein beliebiges Objektoberflächenelement unter Verwendung der entsprechenden Beleuchtungsgeometrie ($\vec{\mathbf{V}}$ und $\vec{\mathbf{L}}$) die in Richtung des Beobachters $\vec{\mathbf{V}}$ abgegebene Lichtintensität errechnet werden.

$$I_{ab} = I_{an} \cdot BRDF(\vec{\mathbf{V}}, \vec{\mathbf{L}}) \quad (3.15)$$

Die im Modell verwendete Reflektanzfunktion lässt sich in einen ambienten, diffusen und glänzenden Anteil unterteilen und mittels Superposition zu einer Funktion überlagern (3.16). Dabei sind äquivalent zu Gleichung (3.13) die Anteile der einzelnen Reflexionsarten mit den Faktoren a , d und s einstellbar.

$$I_{ab} = I_{an} \cdot (s R_{spec}(\vec{\mathbf{V}}, \vec{\mathbf{L}}) + d R_{diff}(\vec{\mathbf{V}}, \vec{\mathbf{L}}) + a) \quad (3.16)$$

Zur Beschreibung der diffusen Reflexion wird das Lambert-Modell verwendet. Besonders dabei ist, dass die reflektierte Lichtintensität unabhängig zur Betrachtungsrichtung gleich groß ist. Sie ist nur vom Winkel α_{nL} des eintreffenden Lichtstrahles $\vec{\mathbf{L}}$ und der Normale $\vec{\mathbf{n}}$ des betrachteten Oberflächenelementes abhängig. Die Konstante k_d wird als diffuser Reflexionsgrad oder auch als *diffuse Albedo* bezeichnet und wird im Bereich $[0, 1]$ angegeben.

$$R_{diff}(\vec{\mathbf{V}}, \vec{\mathbf{L}}) = k_d \cos \alpha_{nL} = k_d \vec{\mathbf{n}} \cdot \vec{\mathbf{L}} \quad \text{wobei } \alpha_{nL} = \angle(\vec{\mathbf{n}}, \vec{\mathbf{L}}) \quad (3.17)$$

Der Anteil der glänzenden (specular) Reflexion nutzt das Phong-Blinn Reflexionsmodell um eine einfache Reflexionsabschätzung zu realisieren. Dabei wird der absolute Winkel zwischen dem halbierenden und normierten Vektor $\vec{\mathbf{H}}$ (3.19) und der Flächennormale $\vec{\mathbf{n}}$ mit einem Materialkennwert für die Glanzeigenschaft der Oberfläche n ($n \geq 1$) potenziert (3.18). Je größer der Wert n ist, desto kleiner erscheint der Glanzfleckradius (Im Anhang Abb. A.3 und Diagramm A.4 sind der Einfluss des Glanzfaktors am Beispiel einer Kugel-Szene abgebildet.). Folglich wirkt die Glanzstelle für den Beobachter intensiver. Der Faktor k_s ist der Glanzlichtreflexionsgrad im Bereich $[0, 1]$.

$$R_{spec}(\vec{V}, \vec{L}) = k_s |\cos \alpha_{nH}|^n = k_s \left| \vec{n} \cdot \vec{H} \right|^n \quad \text{wobei } \alpha_{nH} = \angle(\vec{n}, \vec{H}) \quad (3.18)$$

mit

$$\vec{H} = \frac{\vec{V} + \vec{L}}{|\vec{V} + \vec{L}|} \quad (3.19)$$

Damit lässt sich die Lichtintensitätsberechnung an einem angegebenen Oberflächenelement für einen Beobachter wie folgt zusammenfassen (3.20).

$$I_{ab} = I_{an} \cdot (s k_s \left| \vec{n} \cdot \vec{H} \right|^n + d k_d \vec{n} \cdot \vec{L} + a) \quad (3.20)$$

Abbildung 3.11 zeigt den Einfluss des Glanzfaktors n . Der Anteil an diffuser und glänzender Reflexion ist über alle Bilder der Kugel konstant ($d k_d = 0.75$, $s k_s = 0.25$, $a = 0$). Zu sehen ist, dass sich die Verteilung der Glanzreflexion deutlich von einer überwiegend diffus erscheinenden Kugeloberfläche bis hin zu einer glänzenden Kugel ändert. Eine genaue Darstellung des Einflusses des Glanzfaktors n ist im Anhang A.2 aufgeführt.

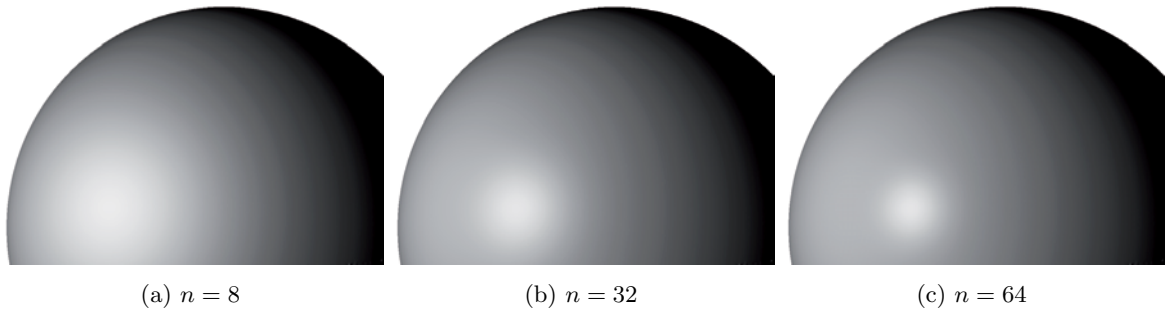


Abb. 3.11: In den Abbildungen 3.11a, 3.11b und 3.11c sind unterschiedliche Glanzintensitäten n mit 8, 32 und 64 dargestellt. Der Anteil an diffuser Reflexion beträgt 75 %, der Anteil glänzender Reflexion ist 25 %.

Im Folgenden ist die Superposition aus diffuser und glänzender Reflexion am Beispiel einer Kugel dargestellt. Abbildung 3.12a zeigt den Anteil diffuser Lichtintensität, wie sie vom Beobachter (Kamera) aufgefangen wird. Die mittlere Abbildung 3.12b zeigt den Anteil an glänzender Reflexion. Dieser zeigt hauptsächlich, in Abhängigkeit des Materialkennwertes n , am Glanzpunkt höhere Intensitäten auf. Im Ergebnis 3.12c entsteht ein Intensitätsbild, welches für jedes Oberflächenfragment Lichtintensitäten im Bereich $[0, 1]$ bzw. $[schwarz, weiss]$ aufweist. Diese Intensitäten ermöglichen unter Verwendung geeigneter Grenzwerte eine tendenzielle Aussage ob ein Bereich unter- bzw. überbelichtet aufgenommen wird.

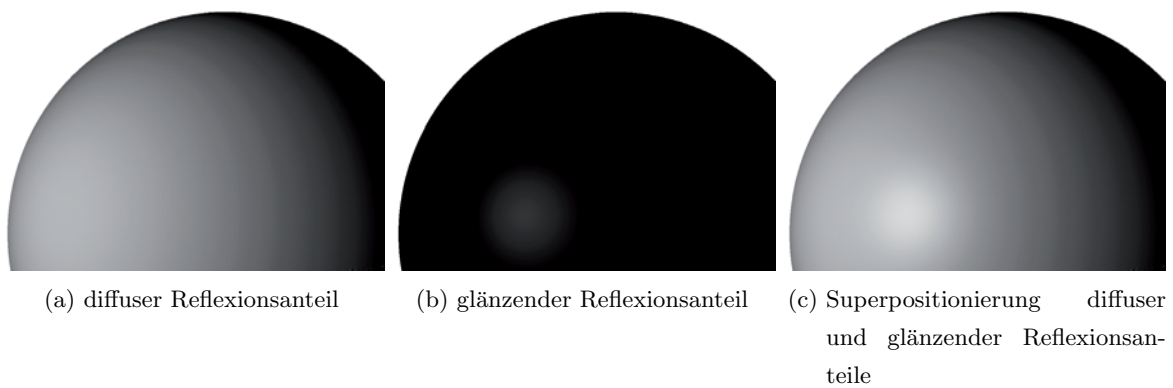


Abb. 3.12: Superposition diffuser und glänzender Reflexionsanteile

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die fotometrischen Eigenschaften einer Oberfläche durch einen umgebenden, einen diffusen und einen vereinfachten glänzenden Anteil beschrieben werden. Die Beschreibung der einfallenden Lichtintensität wird in Form eines lichtquellenentfernungsabhängigen Wertes I_{an} angenommen, wobei die zurückreflektierte Lichtintensität I_{ab} sich in Abhängigkeit der Geometrie, der Faktoren für glänzende und diffuse Reflexion $s k_s$, $d k_d$ bzw. a , sowie eines Glanzfaktors n berechnen lässt.

Die Entfernungsabhängigkeit der Lichtintensität ergibt sich aus der Annahme, dass der Lichtstrom, welcher sich von einer punktförmigen Lichtquelle ausbreitet mit dem Quadrat des Abstandes kleiner wird [Nic70, FDFH90].

Eine genaue physikalische und fotometrische Modellierung des Objektmaterials erfolgt nicht, da die mathematische Beschreibung sowie die Bestimmung der dafür notwendigen Parameter nur mit einem sehr hohen Aufwand möglich ist [DGNK99, HTSG91]. Dieser Aufwand würde dem Ziel, einer effektiven Erfassungsplanung entgegenstehen. Ferner werden die zu erfassenden Objekte mit entsprechender temporärer Beschichtung versehen, um eine optisch nahezu diffus reflektierende Oberfläche zu erhalten, was in der Folge dem beschriebenen Berechnungsansatz genügt.

Tab. 3.2: Parameter welche das fotometrische Verhalten im verwendeten Beleuchtungsmodell beschreiben

Variable	Beschreibung
$t(\mathbf{P}, \mathbf{L})$	Faktor, welcher die einfallende Lichtmenge in Abhängigkeit der Entfernung zur Lichtquelle beschreibt.
$s k_s$	Faktor, welcher den Anteil an glänzender Reflexion beschreibt. Er besteht aus dem Glanzlichtreflexionswert k_s sowie dem Wichtungsfaktor s . Er kann zusammengefasst dargestellt werden und liegt im Bereich $[0, 1]$.
$d k_d$	Faktor, welcher den Anteil an diffuser Reflexion beschreibt. Er ist ebenfalls aus den Faktoren d und k_d zusammengesetzt und wird im Bereich von $[0, 1]$ angegeben.
a	Faktor, welcher den Anteil an umgebender Lichtreflexion beschreibt. Er wird im Bereich $[0, 1]$ angegeben.
n	Ganzzahliger Glanzfaktor des Materials wobei $n \geq 1$. Der Faktor beschreibt die Form des reflektierten Glanzlichtes auf der Oberfläche. Es ist eine empirische Größe welche nicht physikalisch interpretierbar ist. Vielmehr beschreibt sie die geometrische Ausprägung der Glanzstelle.

3.3.4 Einzelner Beobachter

Die Szene wird aus der Perspektive einer Kamera mit Hilfe der Grafikkarte in die entsprechende Bildebene projiziert. Nach der Rasterisierung der Primitive (siehe Abbildung 2.23) erfolgt ein Eingriff in die Renderpipeline über den Fragmentshader. Dort können sowohl Informationen über die Oberflächenkoordinate- und Normale des Flächenfragments, die Codierung des zugrundeliegenden Dreiecks sowie die Position und Orientierung des Projektionszentrums der Kamera abgerufen werden. Des Weiteren wird die Position und Orientierung des Projektors übergeben. Im Algorithmus 3.1 ist der Ablauf der Berechnung pro Beobachter und Fragment aufgezeigt. Anhand der Eingangsdaten lassen sich die aufgezeigten Bedingungen für die Sichtbarkeit eines angegebenen finiten Flächenelementes bestimmen. Ist ein Fragment (identifizierbar durch dessen Index) Teil der umgebenden Objekte, wird an dieser Stelle kein Punkt aufgenommen. Durch die Abstandsberechnung zwischen Fragment und Projektionszentrum kann geprüft werden, ob der vorher festgelegte Schärfentiefebereich verletzt wurde. Über den Anstellungswinkel α_{max} eines Fragments zur Blickrichtung des Beobachters kann geprüft werden, ob eine entsprechende laterale Auflösung eingehalten wird. Dies ist notwendig, da eine gewisse Auflösung benötigt wird, um das projizierte Streifenmuster auf der Oberfläche detektieren zu können. Als Grenzwinkel kann ein Wert von etwa $\alpha_{max} = 70^\circ$ angenommen werden. Die Bestimmung des Reflexionsvektors, bzw. des Halbvektors (vgl. mit Gleichung (3.19)), ermöglicht die Berechnung der lokalen Beleuchtungsintensität gemäß Gleichung (3.20) und somit eine Aussage über unter- oder überbelichtete Bereiche.

Algorithmus 3.1 : Ablaufplan der Sichtbarkeitsberechnung für einen Beobachter (schematisch)

Eingang : Oberflächenkoordinate und -normale, Lichtposition, Blickrichtung und Position der Kamera, Fragment-Id (Dreieckscodierung)

Ergebnis : Aussage zur Sichtbarkeit des Fragmentes

sonstige Parameter : Schärfentiefenbereich, Grenzwerte für Beleuchtung, Reflexionsparameter

Für jedes *Fragment* führe aus

```

Wenn Fragment-Id ist Teil eines Verdeckungsobjektes dann
    | return nicht Sichtbar                /* nicht sichtbar, da Verdeckungsobjekt */
Wenn Abstand Kamera zu Fragment außerhalb des Schärfentiefenbereich dann
    | return nicht Sichtbar                /* da unscharfe Wertaufnahme */
Wenn Winkel Normale zu Blickvektor größer Grenzwert dann
    | return nicht Sichtbar                /* da laterale Auflösung zu klein */
/* Beleuchtungsintensität nach Gleichung (3.20) */
Wenn Beleuchtungsintensität kleiner minimal notwendiger Intensität dann
    | return nicht Sichtbar                /* da unterbelichtet */
Wenn Beleuchtungsintensität größer erlaubter Intensität dann
    | return nicht Sichtbar                /* da überbelichtet */
Zeichne Pixel mit der Farbe der Fragment-Id                /* siehe oben, Codierung */
return Sichtbar

```

Die Aussage, ob ein Fragment im entsprechenden Pixel sichtbar ist, erfolgt über die Ausgabe einer definierten Farbe im gerenderten Ergebnisbild. Diese entspricht dem Index des zugrundeliegenden Dreiecks (Farbcodierung - Abschnitt 3.3.2). Ist das Fragment nicht sichtbar, bleibt es leer (hier Farbe des Hintergrundes, weiß). Aus dem Bild lässt sich die Liste der gesehenen Farben, und damit die Liste der Dreiecks-Ids bestimmen und auswerten.

Die Abbildung 3.13 zeigt eine vereinfachte Szene, in der eine Kugel beobachtet wird. Die im Bild 3.13a blau dargestellten Objekte sollen Verdeckungsobjekte darstellen. In der Mitte (Abb. 3.13b) ist die Klassifizierung der einzelnen finiten Flächenelemente in sichtbare (grün), verdeckende (schwarz) und unterbelichtete (rot) Bereiche zu sehen. Daraus resultiert die in Abbildung 3.13c dargestellten farbkodierten Flächenelemente.

3.3.5 Aussage zur Sichtbarkeit einer Einzelaufnahme

Im Ergebnis der Sichtbarkeitsberechnung für einzelne Beobachter liegen aus der Perspektive der Kameras sowie des Projektors, die jeweiligen Codierungen (ID's) erfasster finiter Flächenelemente vor. Die beobachteten Codes können dabei von verschiedenen Beobachtern gleichzeitig erfasst werden. Je nach Scanneraufbau bzw. Konfiguration (Abschnitt 3.1) lassen sich daraus verschiedene Ergebnisschnittmengen bilden. Grundsätzlich gilt, dass bei Streifen-

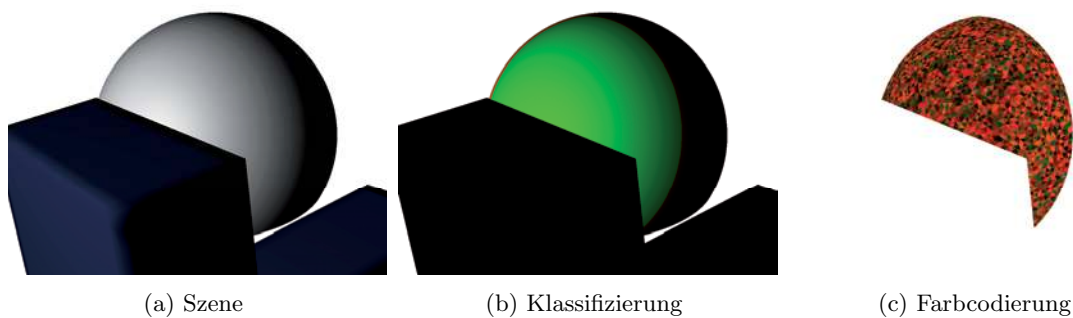


Abb. 3.13: Szene aus der immer gleichen Beobachterperspektive. Links - die eigentliche Szene; Mitte - farbliche Klassifizierung der Oberfläche in sichtbar (grün), verdeckend (schwarz) und unterbeleuchtet (rot); Rechts - Farbcodierte finite Flächenelemente, die weiterführend nutzbar sind.

projektionsverfahren nur Oberflächenbereiche erfasst werden können, die mit dem Projektor ausreichend beleuchtet, also codiert wurden.

Nachfolgend ist die Schnittmengenbildung an bestimmten Beispielsystemen dargestellt (Tabelle 3.3). Hier wird anhand der Scannerkonfiguration unterschieden, für welche Bereiche Punkte theoretisch berechnet werden können. Dabei wird geprüft, welche ID's (Codierung des finiten Flächenelementes) von den Beobachtern erfasst werden.

Tab. 3.3: Schnittmengen zur Sichtbarkeitsberechnung verschiedener Scannerkonfigurationen

Eine Kamera, kalibrierter Projektor	Zwei Kameras, nicht kalibrierter Projektor	Zwei Kameras, kalibrierter Projektor
Erfasst werden Bereiche, die sowohl vom Projektor beleuchtet, als auch von der Kamera beobachtet werden.	Erfasst wird der Bereich, der beleuchtet wird und von beiden Kameras gesehen wird.	Der kalibrierte Projektor ermöglicht das Erfassen von Punkten in Bereichen, die nur von einer Kamera gesehen werden.
z.B.: zScanner der Firma <i>Vialux</i>	z.B.: Atos HR (<i>GOM mbH</i>)	z.B.: Atos Systeme mit Triple-Scan-Technologie (<i>GOM mbH</i>)

4 Erfassungsplanung und Optimierung

Im vorherigen Kapitel wurde ein Verfahren beschrieben, welches bei einer gegebenen Scannerpositionierung den dabei erfassbaren Bereich eines Objektes berechnen kann. Praktisch erfolgt die Datenerfassung eines Objektes durch mehrmaliges Scannen der Oberfläche aus verschiedenen Positionen des Sensors. Somit beschäftigt sich die im Folgenden beschriebene Erfassungsplanung mit der Auswahl geeigneter Scannerpositionen im Bezugssystem des Objektes.

4.1 Erfassungsplanung

Die betrachtete Erfassungsplanung für das Streifenprojektionsverfahren richtet sich in erster Linie nach der Verwendung der aufgenommenen Daten. Daraus ergibt sich die Problemstellung, die passende Scannerkonfiguration (nachfolgend Abschnitt *Ermittlung der Scannerkonfiguration*) zu wählen. Des weiteren muss definiert werden, für welchen Teil des Objektes Daten erfasst werden sollen (nachfolgend Abschnitt *Festlegung der zu erfassenden Objektbereiche*), um die gestellte Anforderung zu erfüllen.

4.1.1 Ermittlung der Scannerkonfiguration

Es wird davon ausgegangen, dass die Datenerfassung mittels maschinell positionierbarem Streifenprojektionsscanner erfolgen soll. Der betrachtete Anwendungsfall sieht weiterhin vor, kommerzielle Systeme zum Scannen zu verwenden. Diese unterscheiden sich i. d. R. in den wichtigen Parametern Auflösung, Bildmaßstab, Messfeldgröße und erreichbarer Genauigkeit (bzw. Mess- oder Aufnahmeunsicherheit). Angaben dazu geben Datenblätter der Hersteller (Abbildung 4.1).

Speziell in der messtechnischen Anwendung der Daten muss gemäß der Prüfplanung (*VDI-Richtlinie 2619 - Prüfplanung* [26185]) die für die Maßabnahme bzw. Merkmalsprüfung notwendige Genauigkeit erreicht werden. Diese sollte erfahrungsgemäß so gewählt werden, dass ein Prüfen festgelegter Toleranzwerte mit der erreichten Genauigkeit des Wertes möglich ist [DK05]. Ferner ist die Genauigkeit auch bei, aus den erfassten Daten abgeleiteten Merkmalen (wie Zylinder, Achsen, Ebenen, etc.) zu beachten. Allerdings ist die erreichte Genauigkeit stark prozess-, bzw. anwendungsbezogen und kann daher, bei gleicher Scannerkonfiguration von Objekt zu Objekt variieren (vgl. hierzu Abschnitt 2.9).

Die Auflösung eines Systems wird meist mit der Kameraauflösung in Pixeln angegeben. Zum Beispiel wird von der Firma *GOM mbH* für den Scanner ATOS II eine Auflösung von 5 *Megapixeln* angegeben, was eine Sensorauflösung von 2448 mal 2050 Pixeln darstellt. Theoretisch entspricht diese Angabe der Zahl an aufnehmbaren Punkten pro Einzelaufnahme. Praktisch wird aber zu Performancesteigerungen bei den Einzelaufnahmen die berechnete Punktanzahl verringert und z. B. nur für jeden zweiten Punkt eine Koordinate bestimmt.

Für die Merkmalsableitung (z. B. beim Zylinderfitting) sowie bei der Verwendung im Bereich Reverse Engineering ist die Ortsauflösung auf der Objektoberfläche von Bedeutung. Diese Angabe beschreibt den durchschnittlichen Punktabstand zwischen den aufgenommenen Punkten. So muss bei detaillierten Oberflächen eine hohe Anzahl von Punkten erfasst werden, um alle Elemente z. B. für eine Flächenrückführung abzubilden. Beim Erfassen von ebenen Bereichen genügen in der Regel weniger Punkte zur Beschreibung. Bei der Anforderung an die Punktanzahl muss abgewogen werden, da eine höhere Ortsauflösung, bei gleicher Auflösung der Kameras, ein kleineres Messfeld zur Folge hat.

2.1 Technische Daten ATOS II, III (Rev.02)

Systemvarianten	ATOS II 400 ATOS II SO	ATOS III 400 ATOS III SO
	Die Zahl am Ende des Systemnamens gibt die Kameraposition (ungefährer Abstand der Kameras in mm) wieder. SO steht für besonders kleine Messvolumen (SO = <u>S</u> mall <u>O</u> bjects)	
Messvolumen in Kameraposition 400	170 x 130 x 130 mm bis 1500 x 1130 x 1130 mm	
Messvolumen in Kameraposition SO	38 x 29 x 15 mm bis 320 x 240 x 240 mm	
Messpunkte pro Einzelscan oder Kameraauflösung	ca. 5 000 000 (2448 x 2050 Punkte)	ca. 8 100 000 (3296 x 2472 Punkte)
Messpunkt- abstände	ATOS 400	0,07 - 0,62 mm
	ATOS SO	11,58 - 95,46 µm

Abb. 4.1: Auszug aus dem Benutzerhandbuch für den ATOS II des Herstellers *GOM mbH* mit Angaben zum Messfeld, der Auflösung, usw.

Die Messfeldgröße wird meist in Form eines für den Nutzer verständlichen geometrischen Volumens (Quader oder Ellipsoid) angegeben und beschreibt den Bereich vor dem Sensor, in dem Punkte erfasst werden können (vgl. Abbildung 2.28). Die Messfeldgröße kann durch die Wahl der Projektor- und Kamerabrennweiten sowie durch deren Position und Orientierung beeinflusst werden. Je größer ein Messfeld ist, desto mehr Oberfläche eines Objektes kann bei einer einzelnen Aufnahme erfasst werden. Jedoch sinkt dabei die Ortsauflösung. Einfluss hat der Parameter auf die Anzahl der Einzelaufnahmen, welche nötig sind, um ein Objekt zu erfassen.

Zu beachten ist, dass es beim Zusammensetzen der Einzelaufnahmen (Abschnitt 2.6.5) durch die sich summierende Transformationsungenauigkeiten von Aufnahme zu Aufnahme zu Fehlern kommen kann. Hier gilt aus praktischer Erfahrung, dass das Objekt nur etwa anderthalb mal größer sein sollte als das Messfeld. Sonst sollten übergeordnete Verfahren zum Ausrichten der Einzelansichten, wie z. B. Photogrammetriesysteme zum Einsatz kommen.

4.1.2 Festlegung der zu erfassenden Objektbereiche

Prinzipiell lässt dabei nach der Merkmalserfassung in Fertigungsmesstechnik und Oberflächenerfassung im Bereich Reverse Engineering unterschieden. Letzteres zeichnet sich dahingehend aus, als dass die erfassten Flächen nachfolgend genutzt werden können. So ist eine Überführung in eine parametrische Flächenbeschreibung (z. B. CAD) oder die Erstellung von Fertigungsdaten denkbar. Um das Maß an Nacharbeit zu reduzieren (Löcher im Dreiecksnetz schließen, das Nachkonstruieren nicht erfasster Bereiche, etc.), kann es erforderlich sein, eine Objektoberfläche so vollständig wie möglich zu erfassen. Das bedeutet, es muss nahezu 100 % der Oberfläche durch eine bestimmte Anzahl an Einzelaufnahmen gescannt werden.

In der Fertigungsmesstechnik wird im Sinne der *VDI-Richtlinie 2619 - Prüfplanung* u.a. festgelegt, welches Merkmal mit welchem Prüfverfahren geprüft werden soll. Hier zielt die Erfassungsplanung darauf ab, die notwendigen Bereiche zu erfassen und nicht das komplette Objekt. Sind im Prüfplan einzelne Merkmale festgelegt, kann anhand der aufgenommenen Daten nicht jeder Wert direkt abgelesen werden. Vielmehr müssen Merkmale aus den Messdaten abgeleitet werden. Beispielsweise erfordert das Merkmal „Zylinderdurchmesser“ erst eine Zylinderbestimmung¹ aus der diskreten Punktwolke des Scans und anschließend die Durchmesserprüfung.

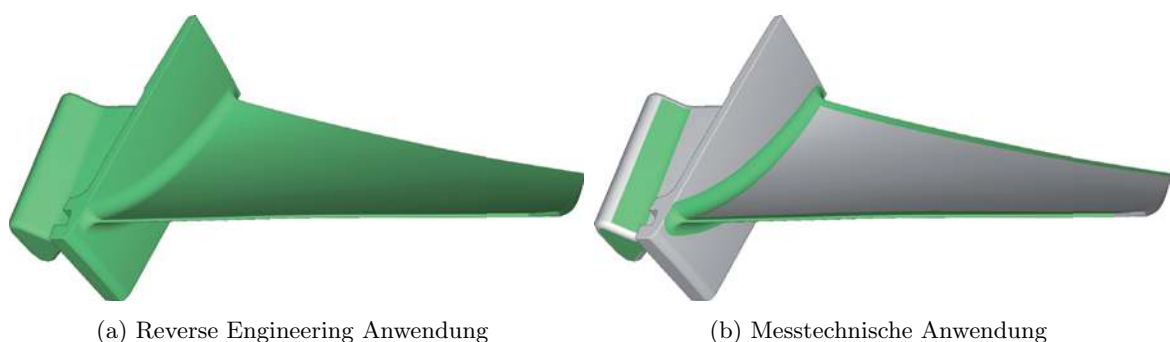


Abb. 4.2: Am Beispiel einer Verdichterschaufel sind je nach Anwendungsfall unterschiedliche Flächen zum Erfassen (grün) definiert.

In Abbildung 4.2 sind am Beispiel einer Verdichterschaufel eines Triebwerkes verschiedene

¹Auch hier kann zwischen verschiedenen Bestimmungsverfahren gewählt werden. So z. B. Hüllzylinder, Ferchzylinder, Gausszylinder, usw.

Erfassungsziele dargestellt. Grün hervorgehoben sind Bereiche, welche durch den Erfassungsplan erfasst werden sollen. In Abbildung 4.2a ist die komplette Oberfläche entscheidend. Dies kann für fertigungstechnische Belange relevante sein (z. B. Ersatzteilerfertigung, Reparatur mittels Auftragsschweißen, etc.). Die Zielstellung in Abb. 4.2b erfordert schwerpunktmäßig die Erfassung von Vorder- und Hinterkantengeometrie sowie die für die Ausrichtung der Schaufel notwendigen Fuss- und Einspannungsbereiche. Diese Datenmenge kann zur Untersuchung von Fertigungsschwankungen dienen und lässt nachfolgend probabilistische Aussagen zur Effektivität eines Triebwerkes zu [HSS09, Hei09].

4.1.3 Aufstellen eines Erfassungsplanes für die Sichtbarkeitsberechnung

Ist die Scannerkonfiguration an die Aufgabenstellung angepasst, müssen für die folgende Sichtbarkeitsberechnung die Variablen gemäß Tabelle 3.1 festgelegt werden. Die Parameter der Kategorie A, insbesondere die Kamera- und Projektoraufösungen sind in den technischen Datenblättern beschrieben. Ebenso lassen sich die Parameter der Kategorie B näherungsweise aus den angegebenen Beschreibungen entnehmen. Unter Umständen können diese Daten auch nach der Sensorkalibrierung entnommen werden. Es folgen die Angaben zur Position \mathbf{cp}_i^W und Orientierung ω_i^W , φ_i^W und κ_i^W des Sensors im Bezugskoordinatensystem $[]^W$ in welchem auch das Objekt definiert ist. Die Scannerposition wird für jede Einzelaufnahme i definiert. Somit lässt sich der Erfassungsplan $EerfP$ zur weiteren Berechnung wie folgt definieren:

$$EerfP = \sum [\mathbf{cp}_i^W; \omega_i^W; \varphi_i^W; \kappa_i^W] \quad \text{wobei: } i = 1 \dots n \quad (4.1)$$

wobei: n = Anzahl der Aufnahmen

4.2 Optimierungsziele

Der festgelegte Erfassungsplan beschreibt eine Anordnung von Aufnahmepositionen um die Oberfläche eines Objektes mittels Streifenprojektionsverfahren zu erfassen. Dabei setzt sich das Erfassungsergebnis aus den, in den Teilansichten erfassten Oberflächenteilen zusammen. Die berechneten finiten Flächenelemente, welche durch das beschriebene Modell als sichtbar gekennzeichnet sind, sind hinsichtlich ihrer Qualität gleichwertig.

Bei der Erfassung können folgende Defizite entstehen:

- Die Aufnahmepositionen sind ungünstig gewählt und in Folge dessen wird nur ein Teil der interessierenden Oberfläche erfasst. Dabei kann es zu redundant aufgenommenen Flächenbereichen kommen.
- Das Objekt ist komplett erfasst, jedoch ist die Anzahl an Einzelaufnahmen sehr hoch. Die Folge ist eine kostenintensive Erfassung bei hohen Stückzahlen.
- Im gegenteiligen Fall können die Einzelaufnahmen gut verteilt, jedoch die Anzahl der Aufnahmen nicht ausreichend sein um das komplette Objekt zu erfassen.

Die einzelnen Problempunkte lassen sich in einem Optimierungsproblem formulieren, welches aus zwei Teilaufgaben besteht:

Ziel 1: Zum einen gilt es, die Flächenabdeckung der zu erfassenden Objektoberfläche zu maximieren. Wird das Problem als Minimierungsproblem formuliert, so ist die Differenz d zwischen der zu erfassenden Oberfläche A_{soll} und erfasster Oberfläche A_{ist} zu minimieren:

$$d = A_{soll} - A_{ist} \rightarrow Min \quad (4.2)$$

Die zu erfassende Fläche wird im Abschnitt 4.1 definiert und kann das komplette Objekt oder nur Teile davon beinhalten.

Ziel 2: Zum anderen soll die Anzahl der Einzelaufnahmen innerhalb eines Erfassungsplanes minimiert werden:

$$n \rightarrow Min \quad \text{wobei: } n = \text{Anzahl der Aufnahmen} \quad (4.3)$$

Die Minimierung der Anzahl der Einzelaufnahmen und gleichzeitig die Maximierung der erfassten Fläche schließt die Reduzierung überlappender Bereiche mit ein.

Die gestellte Optimierungsaufgabe ist ein mehrkriterielles Problem mit der Besonderheit, dass die Anzahl der Aufnahmen n direkt den Anteil der erfassten Oberfläche A_{ist} beeinflusst.

Gleichzeitig variiert die Anzahl der Entscheidungsvariablen durch die sich ändernde Anzahl an Aufnahmen n (Scannerpositionen- und orientierungen).

Ferner lässt sich das Problem nicht geschlossen, bzw. nur mit hohem Aufwand analytisch beschreiben, was ableitungsbasierte Optimierungsalgorithmen zur Lösungsbestimmung ausschließt. Die hohe Anzahl an variablen Parametern lässt zusätzlich auf das Auftreten einer hohen Anzahl lokaler Optima schließen und senkt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit des Auffindens einer globalen, optimalen Lösung. Das zur Lösung verwendete Optimierungsverfahren, die beschränkenden Randbedingungen sowie Vorschläge zur Startwertbestimmung werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.3 Optimierungsverfahren

Zur geforderten Optimierung (im Folgenden wird von Minimierung gesprochen) des aufgezeigten Modells werden numerische Optimierungsverfahren eingesetzt, da eine geschlossene, analytische Lösung nicht möglich ist. Diese laufen i. d. R. iterativ ab (Abb. 4.3), wobei zu Beginn eine gewählte Startkonfiguration berechnet und bewertet wird. Nachfolgend wird geprüft, ob das Bewertungsergebnis dem gestellten Abbruchkriterium genügt. Ist das nicht der Fall, wird eine neue oder veränderte Konfiguration gewählt und der Zyklus erneut begonnen.

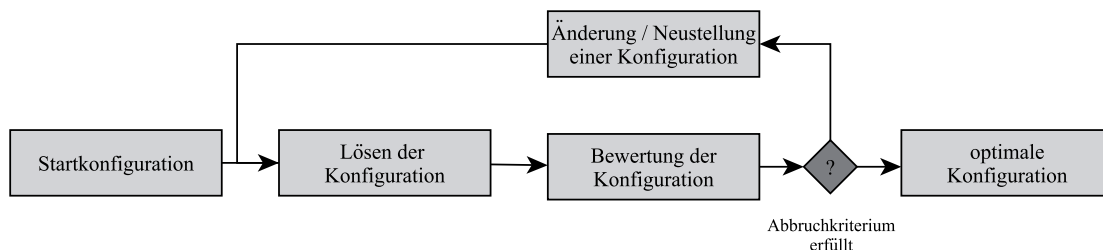


Abb. 4.3: Ablaufschema eines iterativ arbeitenden numerischen Optimierungsverfahrens

Die hier aufgezeigte Problemstellung der Erfassungsberechnung lässt ferner das Bilden eines Gradienten (Berechnung der 1. Ableitung) zur Minimierung nicht zu. Weiterhin ermöglicht die hohe Anzahl an Parametern und die Größe des Suchraumes eine Vielzahl lokaler Minima, weshalb lokal suchende Optimierungsverfahren ausscheiden. Damit fällt die Problemstellung in die Gruppe der globalen (multimodalen), nichtlinearen Optimierung [Pap96].

Zielführend sind die globalen Optimierungsverfahren, welche an verschiedenen Stellen des Suchraumes eine Lösung suchen. Damit steigt auf Kosten des Rechenaufwandes die Wahrscheinlichkeit das globale Minimum zu finden. Jedoch besteht immer die Gefahr, nur ein lokales Minimum gefunden zu haben [Pap96, LES08].

Gängige Verfahren zur globalen Suche sind heuristische Verfahren (z. B. die Complex-Methode [Box65], die Monte-Carlo-Simulation [MGNR12, BJ08] oder das simulierte Ausglühen (simulated annealing) [Kir84]), welche einzelne Entscheidungsparameter durch zufällige Änderung manipulieren, was zu einer neuen, und eventuell besseren Lösung führt.

Das mehrkriterielle Problem (optimale Aufnahmepositionen für gute Flächenabdeckung, minimal mögliche Anzahl an Einzelaufnahmen) soll für eine vereinfachte Lösung in zwei Teile getrennt werden. Dies ist vor allem notwendig, um die Abhängigkeit der Anzahl an Einzelaufnahmen mit der Anzahl an Positionsparametern zu entkoppeln. Die Lösung erfolgt hierarchisch, indem mit einer festen Anzahl an Positionen n eine Optimierung hinsichtlich der Flächenabdeckung (Gleichung (4.2), Abbildung 4.4) erfolgt. Die dabei erfasste Oberfläche wird bestimmt und bei Bedarf mit einer veränderten Anzahl n^* an Aufnahmen erneut hinsichtlich der Abdeckung optimiert.

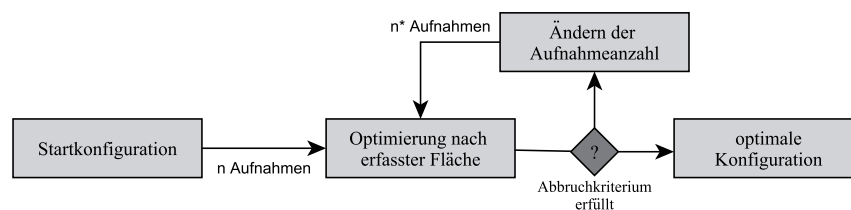


Abb. 4.4: Ablaufschema der Erfassungsplan-Optimierung. Dabei erfolgt die Anpassung der Aufnahmeanzahl n iterativ.

Für die Optimierung der einzelnen Aufnahmepositionen wird im Folgenden ein Verfahren genutzt, welches auf Basis der biologischen Evolution arbeitet. Algorithmen dieser Art werden unter dem Namen *Evolutionäre Algorithmen*, kurz EA, zusammengefasst. Die bekanntesten Verfahren sind die:

- Genetischen Algorithmen [Hol73, Hol75],
- Evolutionsstrategien [Rec80, SHF94],
- Evolutionäres Programmieren [FOW66],
- Differential Evolution [SP97],
- sowie Optimierungsmethoden auf Basis von Schwarmintelligenz [Ken10] oder sog. Ameisenalgorithmen [Mer02].

Die Parameter (hier die Vektoren für Positionen und Orientierungen der Einzelaufnahmen) werden als Genom eines Individuums verstanden. Jedes Individuum hat eine individuelle Ausprägung (Genotyp) der Parameter und somit, hinsichtlich der Optimierung, eine andere Güte (bzw. Fitness). Eine Gruppe von Individuen wird in einer Population zusammengefasst. Eine Generation beschreibt die Population an einem bestimmten Zeitpunkt.

Das Verfahren beginnt mit der Initialisierung einer Startpopulation und der Bewertung der einzelnen Individuen (Abbildung 4.5). Aus dieser Startgeneration werden Individuen gewählt um Nachkommen zu generieren. Dabei haben Individuen mit einer höheren Fitness bessere Chancen als andere Individuen (Paarungsselektion). Aus zwei oder mehr Elternteilen wird durch Kombination der Parameter (Rekombination) ein Nachkomme generiert. Um den vorhandenen Genpool zu ändern, erfolgt eine Mutation einzelner Eigenschaftswerte eines Nachkommenindividuum. Somit ist sichergestellt, dass neue Lösungen entstehen können.

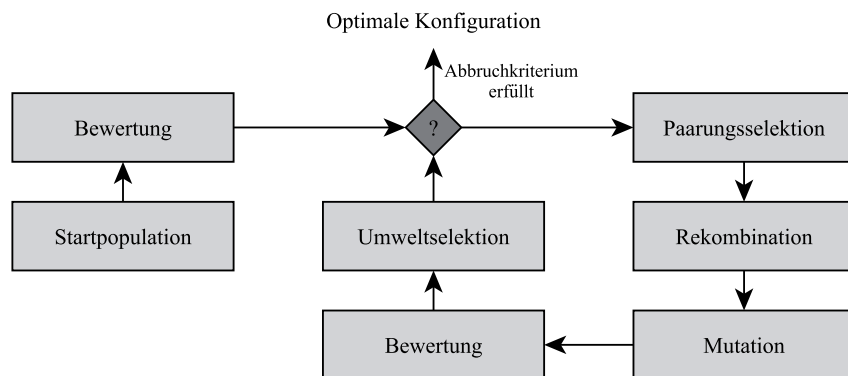


Abb. 4.5: Ablaufschema von evolutionären Algorithmen nach [Wei07]

Abschließend werden die erzeugten Nachkommen bewertet und in die Population integriert. Dabei wird die Zahl der Individuen entsprechend verringert, wobei die Besseren bevorzugt werden (Umweltselektion). Die entstandene Nachfolgegeneration wird hinsichtlich des Abbruchkriteriums geprüft und im Fall, dass kein Abbruch stattfindet, eine neue Generation nach dem beschriebenen Kreislauf errechnet.

Für die einzelnen Bestandteile des Algorithmus gibt es verschiedene Varianten, die entsprechend der Problemstellung angepasst werden können. Diese unterscheiden sich in der Art der Auswahl von Eltern-Individuen, der Kombination der Gene, im Bereich der Mutation von Ausprägungen und in der Auswahl der Nachfolgegeneration. Zusätzlich gibt es Verfahren, die verschiedene Populationen simulieren und dort spezielle Verfahren von Individuen-Wanderung und Konkurrenzkampf anbieten. Des Weiteren gibt es verschiedene Auslegungen, mit welchen Mitteln man nicht zulässige Individuen berücksichtigt. Das ist dann relevant, wenn bei der Variablenausprägung Wertebereichsverletzungen auftreten.

4.4 Randbedingungen und Startwertbestimmung

Neben den genannten Modellparametern (für Scannerkonfiguration und Objektbeleuchtung) gibt es weitere Randbedingungen die bei der Suche eines optimalen Erfassungsplanes eine Rolle spielen. Je nach Anordnung des zu erfassenden Objektes können andere Objekte die Aufnahme durch Abschattung beeinflussen. Diese müssen folglich mit modelliert und bei der Erfassungsberechnung berücksichtigt werden. Im Modell werden diese Verdeckungsobjekte mit eigener Codierung versehen und entsprechend ausgewertet (siehe Abschnitt 3.3.4 und 3.3.5).

Ist die Szene bekannt, ergeben sich Bereiche, bei denen der Scanner mit den Objekten zusammen stoßen kann. Dem kann mit einer Kollisionsberechnung (Scanner zu Szenenobjekten) begegnet werden. Im einfachsten Fall werden, sowohl die Objekte als auch der Scanner mit Hüllkörpern (sog. Bounding Boxen) beschrieben. Diese bestehen aus einfachen geometrischen Volumenprimitiven (bspw. Kugel oder Quader), welche das Objekt vollständig umschließen. Anhand einer Schnittberechnung der einzelnen Hüllgeometrien der Szene und der des Scanners wird eine eventuelle Kollision berechnet.

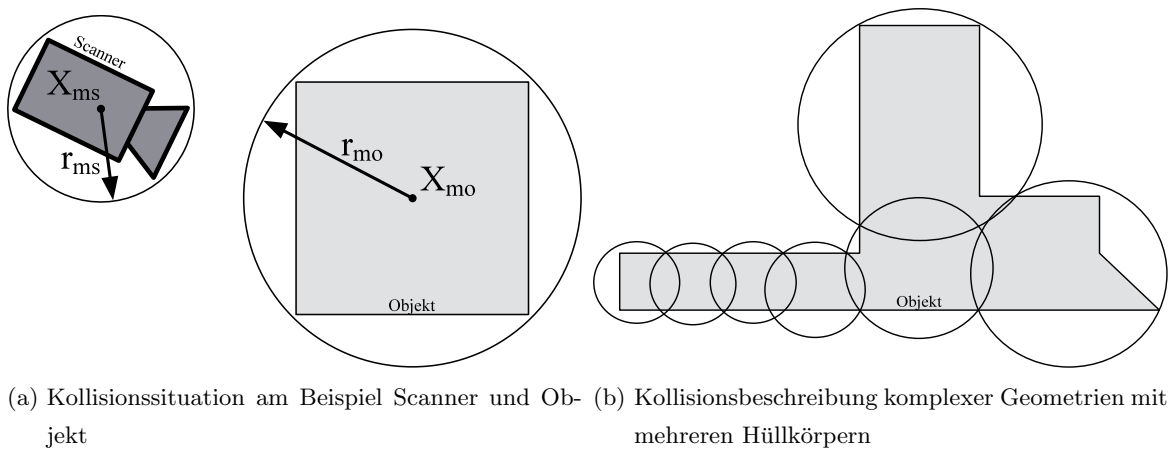


Abb. 4.6: Kollisionssituation (Abb. 4.6a) zwischen Scanner und einem Objekt. Für beide Objekte sind die entsprechenden Hüllkugeln (Mittelpunkte X_{ms} und X_{mo} , Radien r_{ms} und r_{mo}) eingezeichnet. Für komplexe Geometrien können bspw. mehrere Hüllkugeln definiert werden, um eine höhere Detaillierung bei der Kollisionsberechnung zu erhalten (Abb. 4.6b).

Am Beispiel von Hüllkugeln um einen Scanner und ein Objekt ist die Kollisionsberechnung in Abbildung 4.6a und in Gleichung (4.4) dargestellt. Dabei gilt, wenn der Abstand der Mittelpunkte X_{ms} und X_{mo} kleiner oder gleich der Summe der Kugelradien r_{ms} und r_{mo} ist, entsteht eine Kollision.

$$kollision = \begin{cases} Ja, & \text{falls } \overline{X_{ms} X_{mo}} \leq r_{ms} + r_{mo} \\ Nein, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.4)$$

Mathematisch kann auch dann eine Kollision entstehen, wenn sich die Körper und Scanner nicht berühren, jedoch die Hüllgeometrien kollidieren. Hier ist es möglich, das Objekt mit mehreren, besser der Geometrie angepassten Hüllkörpern zu beschreiben (Abb. 4.6b). Jedoch steigt damit auch der Rechenaufwand.

Bei bestimmten Scansystemen ist das Erkennen von Passmarken für das Zusammensetzen von Einzelaufnahmen entscheidend. Folglich ist es wichtig, Passmarken aus der einen Aufnahme auch in einer anderen Aufnahme mit aufzunehmen. Diese Passmarken können, ähnlich wie die finiten Flächenelemente codiert und detektiert werden. Bei der Optimierung muss dann eine zusätzliche Randbedingung eingeführt werden, welche das Auftreten von Passmarken in den Einzelaufnahmen berücksichtigt. Abbildung 4.7 zeigt die geforderte Überdeckung der Passmarken zwischen den Einzelaufnahmen wobei gilt, dass mindestens drei Marken in einer neuen Aufnahme bekannt sein müssen um die Einzelaufnahme in ein Aufnahmekoordinatensystem zu transformieren. Ferner sind auch bei anderen Ausrichtungsmethoden überlappende Bereiche notwendig. Beispielsweise ist bei einer geometriebasierten Zusammensetzung von Einzelaufnahmen die Erfassung der technologischen Basis in allen Ansichten zwingend.

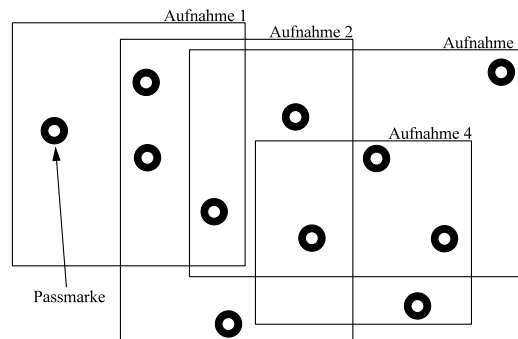


Abb. 4.7: Passmarkenüberdeckung mehrerer Aufnahmen

Für den Erfolg und die Effizienz der Optimierung sind neben den Randbedingungen auch die geeignete Wahl von Startwerten entscheidend. Bei der Wahl von Evolutionären Algorithmen muss eine Startgeneration generiert werden, die bereits gültige Individuen aufweist. Hierfür ist es notwendig, dass alle Scannerpositionen in Richtung des Objektes weisen sowie der Abstand zur Oberfläche innerhalb des Messfeldes liegt. Ferner dürfen keine Kollisionen auftreten. Somit ist ein gültiger Bereich zur Positionierung des Volumens, dessen Oberfläche in maximaler Entfernung gleich der *far*-Distanz liegt (Abb. 4.8).

Der Bereich kann weiter eingeschränkt werden, indem ein Mindestabstand zur Oberfläche entsprechend der *near*-Distanz eingehalten wird. Als initiale Blickrichtung kann die Fokussierung auf den nächstgelegenen Oberflächenpunkt dienen.

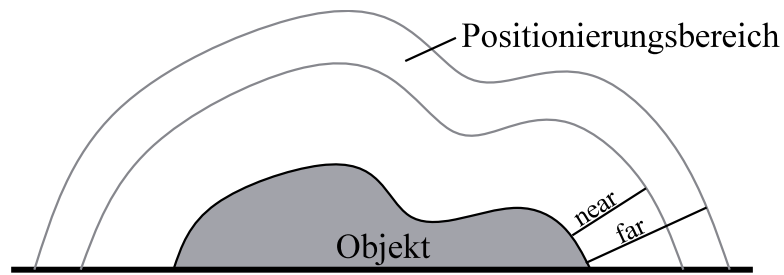


Abb. 4.8: Gültiger Bereich zur Scannerpositionierung

Ferner sind weitere Verfahren zur Startwertgenerierung denkbar. Beispielsweise können von ausgewählten Oberflächenpunkten und deren Normalenrichtungen Startpositionen bestimmt werden, indem der Punkt um die mittlere Messfeldentfernung entlang der Normale verschoben wird. Auch heuristische Verfahren oder das manuelle Festlegen von Startpositionen in einem Erfassungsplan können zielführend sein.

5 Parametrisierung und Optimierung am Beispiel kolibri Flex 100

Bei der Verifizierung des vorgestellten Verfahrens zur Beschreibung und Optimierung der Erfassung von Oberflächen mittels Streifenprojektion soll der automatisierbare Scanner *kolibri Flex 100* (Abbildung 5.1a) der Firma *IVB Jena GmbH*¹ verwendet werden. Nachfolgend wird dieser Scanner sowie die Anpassung der Modellparameter und nachfolgende Optimierung an ausgewählten Beispielen dargestellt.

5.1 Konkrete Scannerkonfiguration kolibri Flex 100

Dieser Scanner wurde ursprünglich für den Dentalbereich entwickelt und ermöglicht neben Aufnahmen aus zwei definierten Scanneranstellwinkeln auch das Drehen eines Objektes auf einem Drehteller.

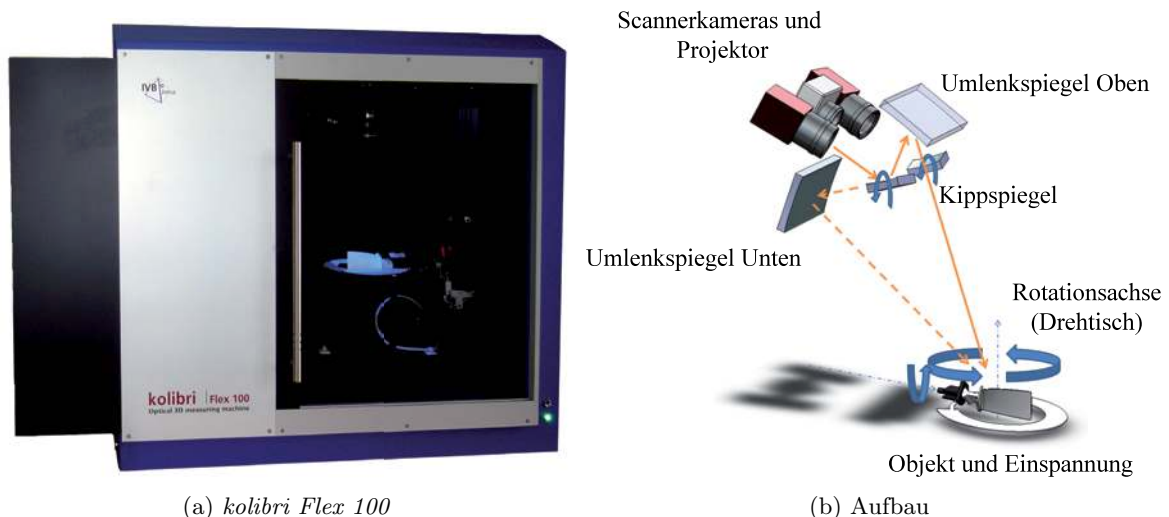


Abb. 5.1: Scanner *kolibri Flex 100* (5.1a) und dessen schematischer Aufbau (5.1b)

Abbildung 5.1b zeigt in vereinfachter Form den funktionalen Aufbau des Scanners. Ein Sensorkopf, bestehend aus einem DLP-Projektor und zwei 1,3 Megapixel Kameras sind im oberen

¹Die Firma *IVB Jena GmbH* gibt es nicht mehr. Stattdessen werden die Nachfolgemodelle durch die Firma *OTTO Vision Technology GmbH* vertrieben (Stand 2015).

Teil des Scanners montiert. Im von der Außenwelt abgeschlossenen Arbeitsraum befindet sich ein ansteuerbarer Drehtisch auf welchem das Objekt fixiert werden kann. Eine Besonderheit des Scanners ist, dass der Sensor nicht direkt auf das zu erfassende Objekte gerichtet ist, sondern der Strahlengang der Kameras und des Projektors über zwei Kippspiegel über den jeweils entsprechenden oberen und unteren Umlenkspiegel umgeleitet wird. Dies ermöglicht zwei Betrachtungs- bzw. Anstellwinkel des Scannerkopfes auf das Objekt.

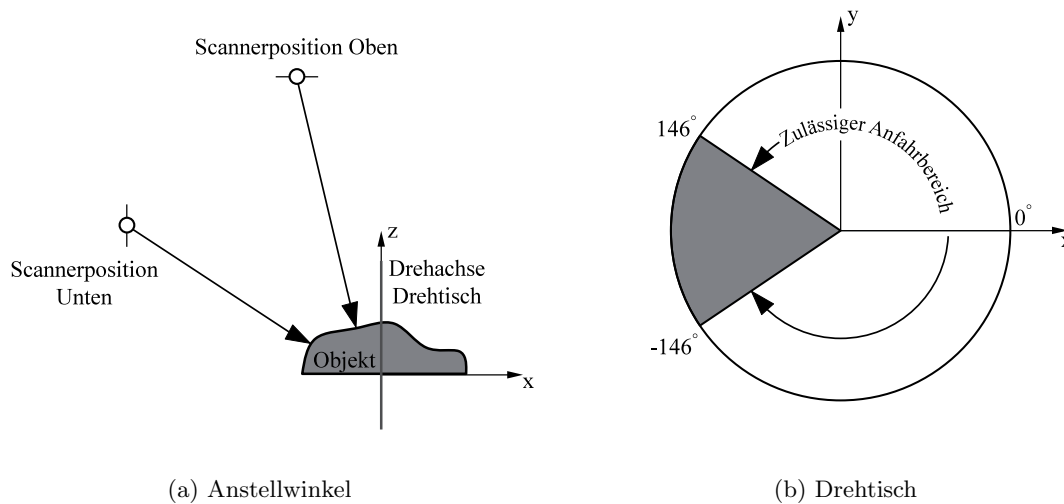


Abb. 5.2: Bewegungsbereiche des Scanners *kolibri Flex 100*; Links (5.2a): aus den Umlenkspiegeln resultierende Anstellwinkel für die Scannerpositionen; Rechts (5.2b): Anfahrbereich des Drehtisches

Die Kipp- und Umlenkspiegel erlauben zwei diskrete Anstellwinkel (Abb. 5.2a) des Sensorkopfes von etwa -61° (Oberer Kippspiegel) und -35° (Unterer Kippspiegel). Dies hat zur Folge, dass sich die Projektionszentren der Kameras nach der Kalibrierung des Systems in einem virtuellen Punkt in der jeweiligen Spiegelebene befinden. Somit sind auch die Abstände (Triangulationsbasis) der Kameras je nach genutztem Umlenkspiegel unterschiedlich lang. Der Projektor befindet sich etwa mittig zwischen den beiden Kameras. Durch die Rotation des Tisches wird das Objekt auf einem fast vollständigen Kreis im Kreisbogen von $[-146^\circ; 146^\circ]$ unter dem Sensor gedreht (Abb. 5.2b). Der übrige Bereich des Drehkreises kann konstruktionsbedingt nicht angefahren werden. Je nach Anstellwinkel wird im Folgenden vom oberen und unteren Drehkreis gesprochen, auf welchem sich der Scanner relativ zum Objekt bewegt.

Über Aufnahmeskripte (sog. *.inp-Files) können Anzahl und die möglichen Positionen des Sensors programmiert werden. Dabei wird speziell die Kippposition des Spiegels sowie die Positionen auf dem Drehkreis (Drehtischwinkel α) festgelegt. Ferner gibt es die Möglichkeit, die Anzahl der verwendeten Belichtungszeiten festzulegen, welche später beim Starten der Messung in Abhängigkeit von der Beleuchtungssituation am Objekt definiert werden.

Die Realisierung verschiedener Messfelder geschieht durch das Wechseln der Kameraobjektive. Im Speziellen wird das *75er* Messfeld genutzt, welches ein Messvolumen von etwa 75 mm Durchmesser und einer Höhe von 40 mm ermöglicht [IVB06].

Die Registrierung der Einzelaufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem erfolgt über eine objekt feste Kamera am Drehtisch, welche zusätzlich das projizierte Streifenmuster beobachtet [Kru09]. Vorteil dieser Variante ist, dass die Transformation ohne z. B. das Bekleben von Marken oder eine geometriebasierte Ausrichtung erfolgen kann. Im Ergebnis liegt eine Punktwolke vor, welche aus den einzelnen Teilaufnahmen zusammengesetzt und registriert wurde.

Das gemeinsame Koordinatensystem ist durch die Drehachse des oberen Drehkreises (entspricht Z-Achse) und der Kameraposition der rechten Kamera während der ersten Aufnahme (vgl. Abbildung 5.3) festgelegt. In Abbildung 5.3 ist die Definition des gemeinsamen Koordinatensystems dargestellt. Anhand von 10 einzelnen Aufnahmen (dargestellt durch die Position der linken Kamera; Pos 1 bis Pos 10), welche jeweils durch einen Drehteller-Rotationswinkel α_i definiert sind, kann ein Drehkreis bestimmt werden. Dessen Drehachse ist als Z-Achse definiert, die Kreisebene beschreibt die XY-Ebene. Die Y-Achse wird durch die Verbindung Schnittpunkt Drehachse zu XY-Ebene und Position Pos 1 definiert. Dieses Koordinatensystem wird im Folgenden als *Ergebnis-Koordinatensystem* mit der Indizierung $[]^E$ bezeichnet.

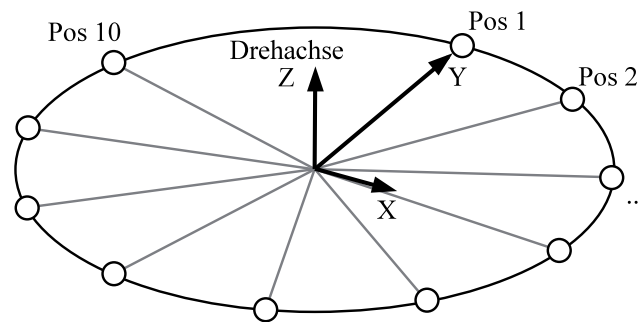


Abb. 5.3: Koordinatensystemfestlegung am *kolibri Flex 100*. Die Festlegung erfolgt durch die Bestimmung der Drehachse auf Basis der Kamerapositionen im oberen Drehkreis. Die Ausrichtung der X- und Y-Achsen erfolgt durch die Position der ersten Kamera während der ersten Aufnahme ($X = 0$)

Um das beschriebene Modell am Beispiel des *kolibri Flex 100* zu nutzen, müssen die Parameter aus Tabelle 3.1 für das System angepasst werden. Das sind für die geometrischen Eigenschaften:

- Sensorgröße in Pixeln
- Positionen und Orientierungen der Kameras und des Projektors im oberen und unteren Drehkreis
- Kameraöffnungswinkel und Tiefenschärfebereich
- Position des Sensors in Abhängigkeit des Drehtellerwinkels

Ziel dabei ist, dass das berechnete Kamerabild den selben Bildausschnitt sowie den gleichen Bildmaßstab aufweist, wie das reale Kamerabild an der gleichen Position. Neben den soeben genannten Parametern sind die fotometrischen Parameter so anzupassen, dass das Reflexionsverhalten der realen (Licht-)Situation entspricht. Dazu sind die einzelnen Parameter:

- für den Anteil diffuser und glänzender Reflexion (dk_d und sk_s),
- den Anteil an umgebendem Licht a ,
- als auch der Glanzfaktor n

entsprechend der zu erfassenden Objektoberfläche zu bestimmen. Ferner soll die Abhängigkeit der Lichtintensität von der Entfernung des Oberflächenpunktes zur Lichtquelle des Projektors beschrieben werden. Die Lichtintensität, welche mit dem Abstandsquadrat der Lichtquelle abnimmt (Abschnitt 3.3.3), wird aufgrund der relativ großen Entfernung und des dazu kleinen Erfassungsbereiches, linearisiert beschrieben. Dazu sind die Verschiebung und der Anstieg der Funktion zu bestimmen.

5.2 Bestimmung geometrischer Parameter

Anhand der Gerätedokumentation lässt sich die Größe des Sensors mit 1392 mal 1040 Pixeln angeben. Die weiteren Parameter der Kategorie B aus Tabelle 3.1 erfordern ein kalibriertes Real-System, und müssen danach mit Hilfe eines Testaufbaues ausgelesen bzw. bestimmt werden. Auch zur Bestimmung der Abhängigkeit von Drehtischwinkel zur Scannerposition wird ein Testaufbau benötigt. Dieser besteht aus einem Kugelobjekt (Abb. 5.4) und der für die Aufnahme notwendigen Einspannungsplattform. Die Kugel besteht aus Aluminium und wurde für die Aufnahme mit einem Entspiegelungsspray weiß mattiert. Somit nimmt die Kugel eine fast diffus reflektierende Oberfläche an.

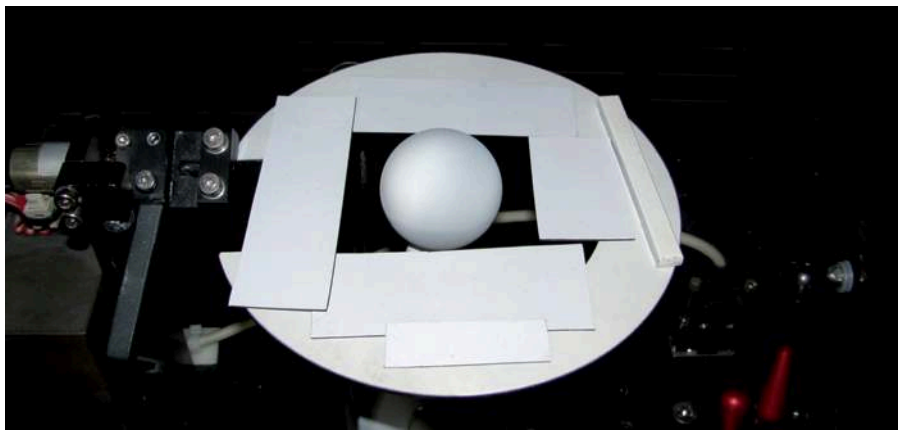


Abb. 5.4: Aufbau zur Parameterbestimmung mit *kolibri Flex 100*.

Die Szene wird mit einem definierten Erfassungsplan gescannt. Der Plan beinhaltet beide möglichen Kippwinkel, also den oberen und unteren Drehkreis, sowie jeweils 10 Einzelaufnahmen durch Angabe eines Drehtischwinkels α (vgl. Gleichung (5.1)).

$$\alpha = [-146, -114, -81, -49, -16, 16, 49, 81, 114, 146]^\circ \quad (5.1)$$

Bestimmung von Kameraposition und Orientierung Im Ergebnis liegen neben der gescannten Punktwolke der Kugel auch die Kamerapositionen beider Kameras während der Einzelaufnahmen im oben beschriebenen Koordinatensystem $[]^E$ vor. Dabei erfolgt die Beschreibung der jeweiligen Position durch den entsprechenden Positionsvektor im Ergebnis-Koordinatensystem. Die Orientierung wird im selben Bezugssystem mit den Winkeln analog einer terrestrischen Aufnahme (Abschnitt 3.1.1) beschrieben.

Im Folgenden wird für den oberen und unteren Drehkreis jeweils eine Scannergeometrie erstellt. Diese unterscheidet sich in Position und Orientierung, da es, wie oben beschrieben, durch die Kippspiegelumlenkung zu unterschiedlichen Abständen zwischen der linken und rechten Kamera kommt. Für eine Aufnahmeposition i (abhängig von α_i) lassen sich je nach

Drehkreis die abgelesen Parameter für die linke Kamera (Index $C1$, oberer Drehkreis - rechte Kamera Index $C2$ sowie unterer Drehkreis analog) wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{cp}_{i,C1}^E(\alpha_i, \text{Oben}) & \quad \text{Position der linken Kamera im oberen Drehkreis} \\
 \omega_{i,C1}^E(\alpha_i, \text{Oben}) & \quad \text{Kippwinkel X-Achse der linken Kamera im oberen Drehkreis} \\
 \varphi_{i,C1}^E(\alpha_i, \text{Oben}) & \quad \text{Kippwinkel Y-Achse der linken Kamera im oberen Drehkreis} \\
 \kappa_{i,C1}^E(\alpha_i, \text{Oben}) & \quad \text{Kippwinkel Z-Achse der linken Kamera im oberen Drehkreis}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Nachfolgend wird der Positionsvektor um den angegebenen Drehwinkel α_i in das Scannerkoordinatensystem $[]^S$ unter Nutzung der Rotationsmatrix um die Z-Achse \mathbf{R}_κ transformiert. Auch die Orientierung κ wird um den Drehwinkel zurückgedreht:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{cp}_{i,C1}^S(\text{Oben}) &= \mathbf{R}_\kappa(-\alpha_i) \mathbf{cp}_{i,C1}^{Erg}(\alpha_i, \text{Oben}) \\
 \kappa_{i,C1}^S(\text{Oben}) &= \kappa_{i,C1}^{Erg}(\alpha_i, \text{Oben}) - \alpha_i
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Alle transformierten Einzelpositionen der Kameras können weiter zu einem Punkt zusammengefasst werden. Da jedoch die Positionierung des Drehtisches konstruktionsbedingt nicht exakt ist, wird der Mittelwert aus den einzelnen Parametern bestimmt:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{cp}_{C1}^S(\text{Oben}) &= \overline{\mathbf{cp}_{i,C1}^S(\text{Oben})} \\
 \omega_{C1}^S(\text{Oben}) &= \overline{\omega_{i,C1}^S(\text{Oben})} \\
 \varphi_{C1}^S(\text{Oben}) &= \overline{\varphi_{i,C1}^S(\text{Oben})} \\
 \kappa_{C1}^S(\text{Oben}) &= \overline{\kappa_{i,C1}^S(\text{Oben})}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Die Rotation zu einer drehwinkelunabhängigen Beschreibung ist in Abbildung 5.5 für zwei Aufnahmen i und $i + 1$ dargestellt. Zu sehen ist, dass sich die Kameras $C1$ und $C2$ der Einzelaufnahmen durch Rotation um den Drehwinkel in das Scannerkoordinatensystem transformieren lassen.

Bestimmung der Projektorposition Das Projektorlicht wird ebenfalls über einen Kippspiegel analog der Kameras umgeleitet. Da der Projektor nicht kalibriert wird, lässt sich eine genaue Position nicht auslesen und wird näherungsweise mittig zwischen den Kameras angenommen. Gleichung (5.5) zeigt die Berechnung der Projektorposition für den oberen Drehkreis. Die Berechnung des unteren Drehkreises erfolgt auf die gleiche Weise.

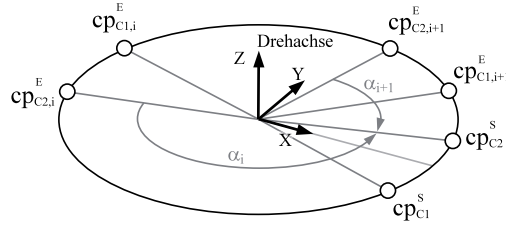


Abb. 5.5: Rücktransformation zweier Einzelaufnahmen in Scannerbezugssystem. Am Beispiel der Kameraposition der rechten Kamera \mathbf{cp}_{C2} wird exemplarisch die Rücktransformation in das Scannerbezugssystem um den Drehwinkel α nachgezeichnet.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{cp}_{Proj}^S(\text{Oben}) &= \overline{\mathbf{cp}_{C1}^S(\text{Oben}), \mathbf{cp}_{C2}^S(\text{Oben})} \\
 \omega_{Proj}^S(\text{Oben}) &= \overline{\omega_{C1}^S(\text{Oben}), \omega_{C2}^{Scan}(\text{Oben})} \\
 \varphi_{Proj}^S(\text{Oben}) &= \overline{\varphi_{C1}^S(\text{Oben}), \varphi_{C2}^{Scan}(\text{Oben})} \\
 \kappa_{Proj}^S(\text{Oben}) &= \overline{\kappa_{C1}^S(\text{Oben}), \kappa_{C2}^{Scan}(\text{Oben})}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Mit den angegebenen Parametern lässt sich der Scanner durch Angabe der Transformationsmatrizen für die Kameras (\mathbf{T}_{Cam} nach Gleichung (3.1.1)) wie folgt beschreiben (vgl. Abschnitt 3.1.1):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}_{Cam1} &= \mathbf{T}_{Cam}(\omega_{C1}^S, \varphi_{C1}^S, \kappa_{C1}^S, \mathbf{cp}_{C1}^S) && \text{für Kamera 1} \\
 \mathbf{T}_{Cam2} &= \mathbf{T}_{Cam}(\omega_{C2}^S, \varphi_{C2}^S, \kappa_{C2}^S, \mathbf{cp}_{C2}^S) && \text{für Kamera 2} \\
 \mathbf{T}_{Proj} &= \mathbf{T}_{Cam}(\omega_{Proj}^S, \varphi_{Proj}^S, \kappa_{Proj}^S, \mathbf{cp}_{Proj}^S) && \text{für den Projektor}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Mit diesen Matrizen und einer drehwinkelabhängigen Transformationsmatrix $\mathbf{T}_{Scan}(\alpha_i)$ können die für die Abbildung notwendigen Kameravektoren (*Cam-Forward*, etc.) mit der Gesamttransformationsmatrix (Gleichung (5.7)) für die Sichtbarkeitsberechnung bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.5 und 3.1.1).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}_{Cam1ToWorld}(\alpha_i) &= \mathbf{T}_{Scan}(\alpha_i) \mathbf{T}_{Cam1} \\
 \mathbf{T}_{Cam2ToWorld}(\alpha_i) &= \mathbf{T}_{Scan}(\alpha_i) \mathbf{T}_{Cam2} \\
 \mathbf{T}_{ProjToWorld}(\alpha_i) &= \mathbf{T}_{Scan}(\alpha_i) \mathbf{T}_{Proj}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Indirekte Bestimmung des Bildöffnungswinkels Für die Bestimmung des Bildöffnungswinkels θ_h wird die Brennweite der Kameras benötigt, welche jedoch am *kolibri Flex 100* nicht ablesbar ist. Vielmehr wird im Folgenden ein alternatives Verfahren vorgestellt, welches den Bildöffnungswinkel und damit den exakten Bildmaßstab bestimmt. Dazu wird mit den oben bestimmten Positionen des Scanners der Versuchsaufbau nachgestellt, wofür die erfasste Punktwolke des Testaufbaues zur Nachmodellierung der Szene durch eine Kugel und den entsprechenden Randabdeckungen dient (Abbildung 5.6).

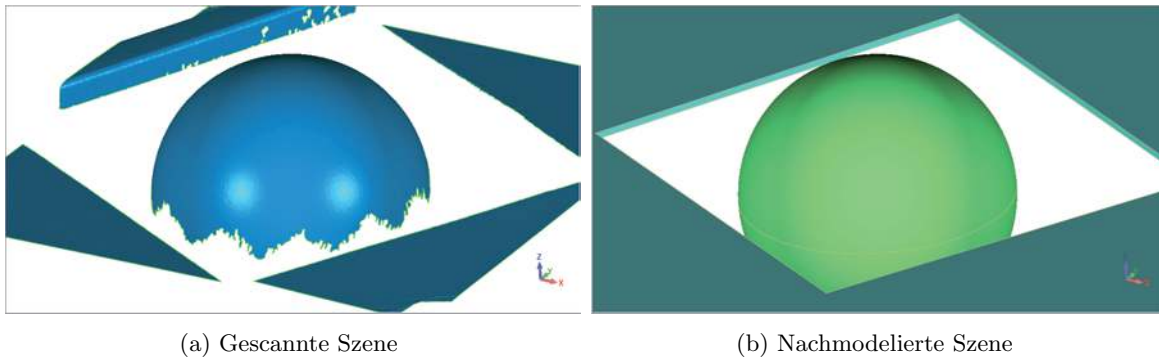
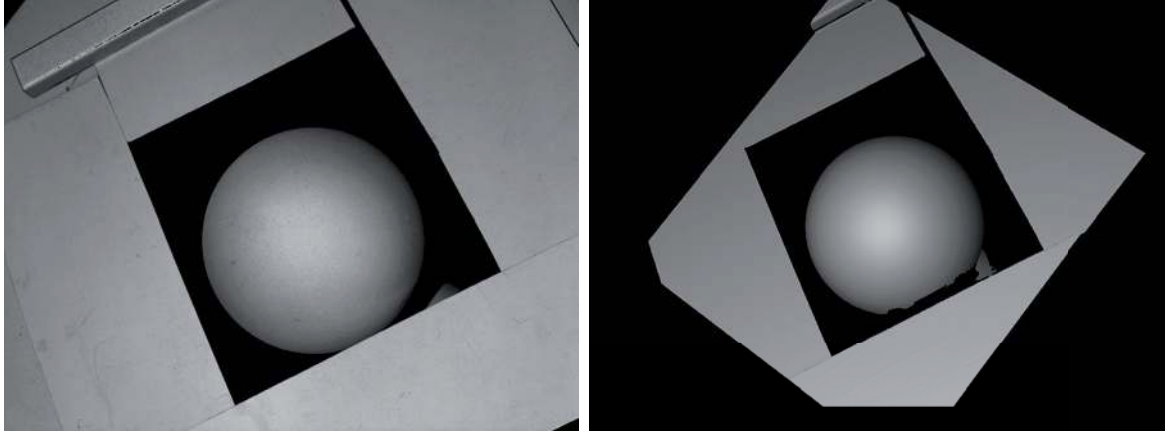


Abb. 5.6: Nachmodellierter Testaufbau zur Bildöffnungswinkelbestimmung anhand des gescannten und triangulierten Testaufbaues (5.6a). Die Kugel, sowie die relevanten Einspannungsobjekte wurden im gleichen Bezugssystem $[\]^E$ nachmodelliert (5.6b).

Mit der Szene des Testaufbaues werden einzelne Positionen des Erfassungsplanes aus Sicht der Modell-Kameras gerendert. Dabei wird ein initialer Bildöffnungswinkel $\theta_{h,model\ init}$ angenommen. Gleichzeitig erfolgt das Ausleiten von Screenshots der entsprechenden realen Scannerkameras am *kolibri Flex 100*. Beide Ansichten sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Zu sehen ist, dass bei falschem Bildöffnungswinkel der Bildmaßstab nicht übereinstimmt. Die reale Kugel erscheint im Bildausschnitt größer als im Modell. Folglich ist der initiale Bildöffnungswinkel zu groß angenommen.

Bei der Testszene wurde als Testobjekt eine Kugel gewählt. Das hat den Vorteil, dass zum einen die Szene schnell nachmodelliert werden kann (siehe oben), zum anderen ergibt die Abbildungsprojektion immer die Form eines Kreises. Durch die Bestimmung der kreisförmigen Kugelsilhouette kann nachfolgend der Bildmaßstabsunterschied zwischen realem und errechneten Bild berechnet werden.



(a) Screenshot aus Scannerperspektive (linke Kamera) (b) berechnete Ansicht aus der gleichen Position

Abb. 5.7: Testszene zur Bestimmung des Bildöffnungswinkels. Zu sehen ist in Abb. 5.7a die Ansicht der linken Kamera des Scanners. Abbildung 5.7b zeigt die mit dem Berechnungsmodell errechnete Ansicht der selben Kamera. Der Bildmaßstab, und somit der Bildöffnungswinkel stimmen nicht überein.

Die Berechnung der Kugelsilhouette erfolgt durch Binarisierung der Aufnahmen (Gleichung (5.8), Abbildung 5.8a) durch einen angegebenen Schwellwert t_g . Dies ist möglich, da sowohl im realen Scanner als auch im Berechnungsmodell die umgebende Szenen nicht ausgeleuchtet wird und somit sehr dunkel erscheint. Folglich lässt sich der Vordergrund, also die Szene, vom Hintergrund trennen.

$$I_{u,v} = \begin{cases} 1, & \text{falls } I_{u,v} \geq t_g \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.8)$$

Danach werden die Kantenpixel detektiert und mit den Randpixeln der Kugelsilhouette eine Kreisgleichung (Fehler-Quadrate-Minimierung (*Least Squares Method*) nach Gauss) durchgeführt. Im Ergebnis liegen der Mittelpunkt des Kreises, sowie der Durchmesser in Bildkoordinaten vor. Abbildung 5.8b zeigt die detektierten Randpunkte, welche die Grundlage zur Kreisbestimmung bilden.

In der ersten Iteration ist lediglich die Bestimmung und das Gleichsetzen des Bildmaßstabes im realen und im errechneten Kamerabild durch die Einstellung des Bildöffnungswinkels im Modell von Interesse. Dabei verhält sich die Abweichung der Durchmesser der Kugelsilhouette im realen Bild \varnothing_{real} zum Durchmesser \varnothing_{modell} im berechneten Bild umgekehrt proportional zum entsprechenden Bildöffnungswinkel (5.9).

$$\frac{\varnothing_{real}}{\varnothing_{modell}} = \frac{\theta_{h,modell\,init}}{\theta_{h,real}} \quad (5.9)$$

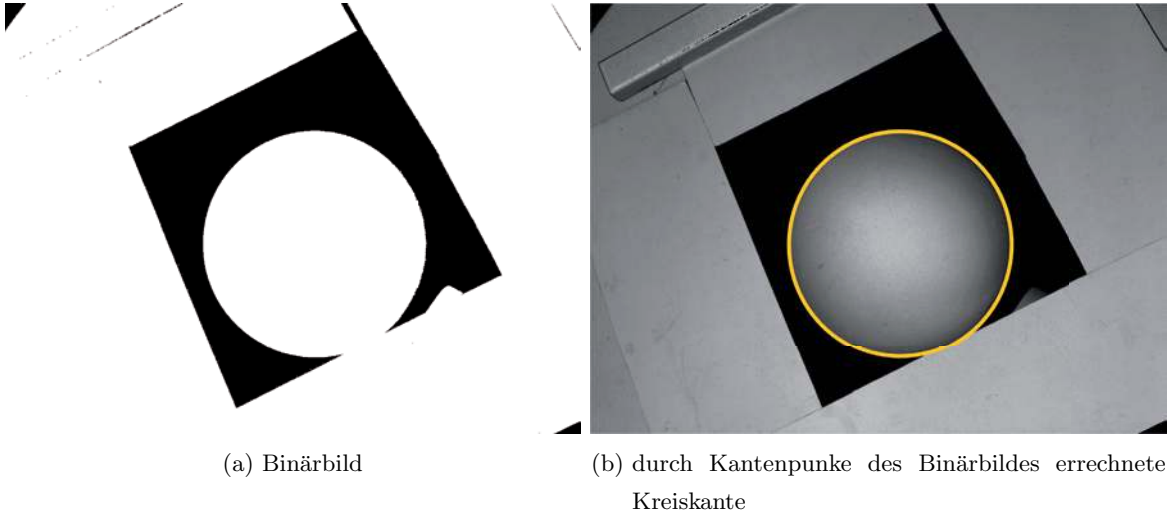
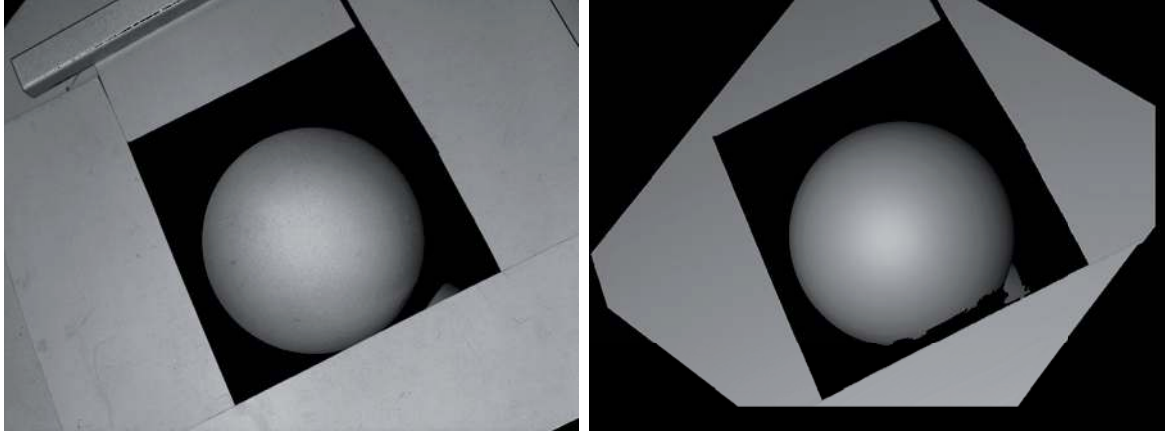


Abb. 5.8: Bestimmung der kreisförmigen Kugelsilhouette. Durch Kantenbestimmung am Binärbild 5.8a lässt sich die Kugelsilhouette Abb. 5.8b bestimmen. Durch Auslesen des Durchmessers lässt sich der Bildmaßstab von berechnetem zu realem Bildausschnitt bestimmen.

Der gesuchte Bildöffnungswinkel $\theta_{h,model\ neu}$ entspricht dem Bildöffnungswinkel $\theta_{h,real}$ der realen Ansicht. Somit lässt sich umstellen:

$$\theta_{h,model\ neu} = \theta_{h,real} = \frac{\varnothing_{modell}}{\varnothing_{real}} \cdot \theta_{h,model\ init} \quad (5.10)$$

Nach Änderung der Modellkameraparameter weist das berechnete Kamerabild den gleichen Abbildungsmaßstab auf. In Abbildung 5.9 ist die eben erfasste Szene noch einmal mit korrigiertem Kameraöffnungswinkel dargestellt.



(a) Screenshot aus Scannerperspektive (linke Kamera) (b) berechnete Ansicht aus der gleichen Position

Abb. 5.9: Testszene mit kalibriertem Bildöffnungswinkel. Zu sehen ist in Abb. 5.9a die Aufnahme der linken Kamera. Daneben, in Abb. 5.9b, das errechnete Kamerabild aus der gleichen Kameraposition. Es tritt kein Bildmaßstabsunterschied auf.

Bestimmung der Schärfentiefe Die im Modell verwendeten Parameter *near* und *far* zur Beschreibung des Schärfentiefebereiches werden empirisch angegeben. Sie orientieren sich an der Messfeldmitte und den Herstellerangaben zur Messfeldgröße.

In Gleichung (5.11) wird mit dem Abstand der Kamera zur Messfeldmitte h^* und der angegebenen Höhe des Messfeldes h_{field} die Schärfentiefe entsprechend angegeben.

$$\begin{aligned} near &= h^* - |h_{field}| \\ far &= h^* + |h_{field}| \end{aligned} \tag{5.11}$$

5.3 Bestimmung fotometrischer Parameter

Die Bestimmung der fotometrischen Parameter muss für ein entsprechendes Material und die verwendete Belichtungszeit angepasst werden. Dies ist notwendig, da die Reflexionseigenschaften, diffuse und glänzende Reflexion sowie der Reflexionsgrad, materialabhängig sind. Wird ein Objekt entsprechend oberflächenbehandelt (eingeweißt) so sind die Parameter entsprechend anzupassen.

Die Bestimmung des entfernungsabhängigen Lichtintensitätsabfalles kann in erster Näherung durch die Aufnahmen des Testaufbaues bestimmt werden. In Abbildung 5.10 ist am Beispiel eines Kamerafotos (linke Kamera) aus dem unteren Drehkreis (Drehwinkel $\alpha = -146^\circ$) die Beleuchtung bei der verwendeten Aufnahmebelichtungszeit dargestellt. Zu sehen ist zum einen, dass die Helligkeit mit der Entfernung zur Lichtquelle hin abfällt. Zum anderen bildet

sich ein der Kugelgeometrie angepasster Helligkeitsverlauf aus. Aufgrund der diffus reflektierenden Oberfläche der Kugel (die Kugel ist entsprechend eingeweißt) ist nur eine flache Glanzstelle ausgebildet.

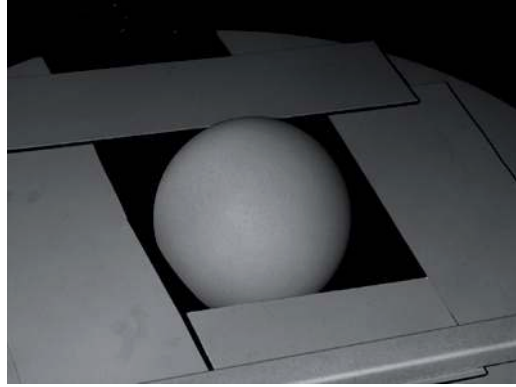


Abb. 5.10: Reale Beleuchtungssituation während der Aufnahmen am Testaufbau.

Bei der fotometrischen Kalibrierung wird von einem linearisierten Intensitätsverlauf $I_{an} = I(h)$ (Gleichung (3.14)) bei zunehmender Entfernung h zur Lichtquelle ausgegangen. Dies ist möglich, da die real quadratisch abfallende Beleuchtungsstärke einer Punktlichtquelle sich im Erfassungsbereich annähernd linear verhält. Der Intensitätsverlauf soll in Messfeldmitte in etwa der Normierung 1 entsprechen, und nach hinten hin abfallen, nach vorn zunehmen. Zur Ausrichtung der linearen Funktion werden die Distanzen *near* und *far* des Messsystems benutzt und entsprechenden Intensitätswerten I_{near} bzw. I_{far} zugeordnet. Am Beispiel wurden folgende Werte gesetzt:

$$\begin{aligned} I_{near} &= I(near) = a \\ I_{far} &= I(far) = b \end{aligned} \tag{5.12}$$

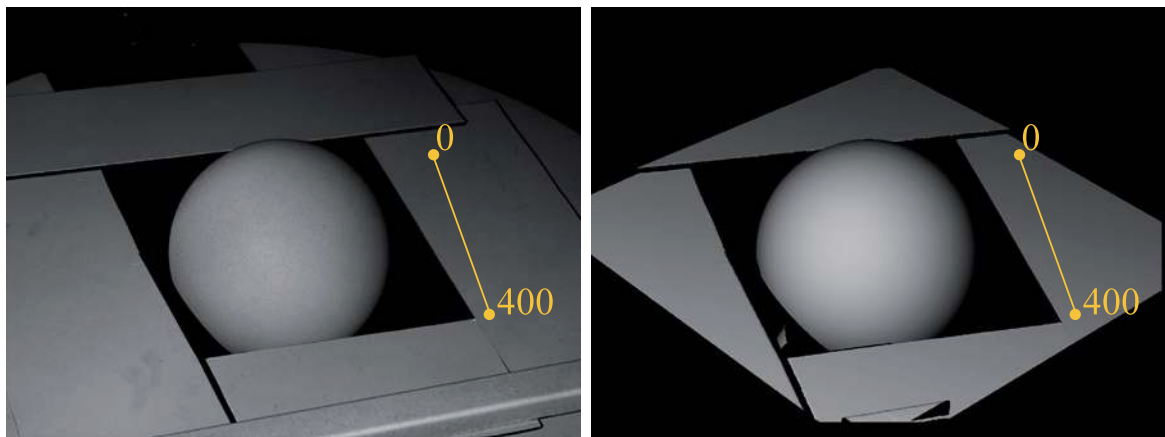
Anhand der gewählten Werte a und b kann eine Funktion zur Beschreibung der entfernungsabhängigen Intensität aufgestellt werden:

$$I(h) = \frac{b - a}{far - near} h + \left(a - \frac{b - a}{far - near} near \right) \tag{5.13}$$

Zur Bestimmung der Parameter wird die reale Aufnahme mit dem berechneten Helligkeitsbild verglichen. Um Überlagerungen der verschiedenen Beleuchtungsparameter zu vermeiden, wird ausschließlich mit einem diffusen Reflexionsanteil gerechnet. Die im Testaufbau verwendeten, ebenen Randplatten neben dem eigentlichen Objekt (siehe Abbildung 5.4 und 5.10) ermöglichen eine Aussage zur Intensität ohne den direkten Einfluss der flächennormalenabhängigen diffusen Reflexion (die Normale ist gleich groß, somit ist der reflektierte diffuse Lichtanteil bei steigender Entfernung konstant). Die Werte a und b werden so gewählt, dass

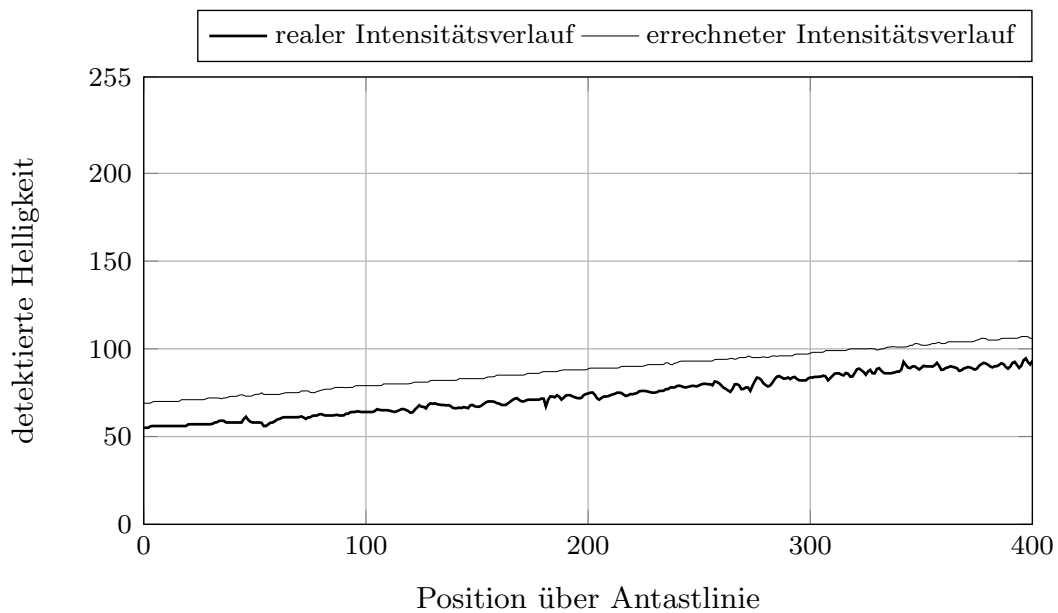
der Anstieg der Helligkeitsänderung im Bereich der Randplatten gleich groß ist. Dazu wird ein Gradient innerhalb der Randplatten festgelegt und der Helligkeitsverlauf abgelesen.

Die Abbildungen 5.11a und 5.11b zeigen den Gradienten zwischen den Punkten 0 und 400 im originalen und errechneten Kamerabild. Die Helligkeitswerte sind pixelweise ausgelesen und im Diagramm 5.11c vom Punkt 0 beginnend, übereinander dargestellt. Nach dem Anpassen der Werte, für $a = 1.4$ sowie für $b = 0.6$ ist der Helligkeitsanstieg beider Gradienten gleich groß.



(a) Originale Aufnahme

(b) Virtuelle Aufnahme



(c) Intensitätsverlauf

Abb. 5.11: Das originale 5.11a und berechnete 5.11b Kamerabild einer Aufnahme des Testaufbaues. Anhand der Antastlinie (gelb) wurden die Intensitätswerte in einem gemeinsamen Diagramm 5.11c übereinander dargestellt. Zu sehen ist, dass bei den verwendeten Parametern $a = 1.4$ und $b = 0.6$ die Anstiege der Helligkeiten gleich groß sind.

Im Folgenden werden anhand der Testszene die Reflexionsparameter am Beispiel der Kugeloberfläche entsprechend angepasst. Das Ziel ist, die Helligkeitsverläufe durch die Reflexionsparameter dk_d , sk_s , a und den Glanzfaktor n auf dem zu erfassenden Objekt (Kugel) in der errechneten Ansicht dem der realen Ansicht anzupassen. Die zuvor berechnete Entfernungsabhängigkeit bleibt dabei erhalten. Abbildung 5.12 zeigt eine originale Kameraansicht (links) mit dem auftretenden realen Helligkeitsverlauf. Dem gegenüber ist eine errechnete Ansicht (rechts) aus der gleichen Scannerposition dargestellt. Zur Berechnung wurden initiale Parameter zur fotometrischen Beschreibung genutzt, welche die reale Situation nicht abbilden.

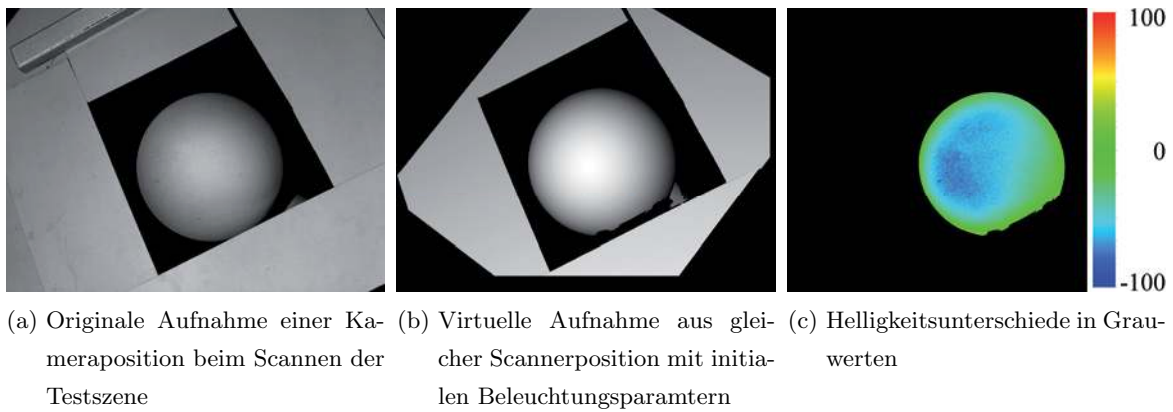


Abb. 5.12: Ausgangssituation: Das für eine Scannerposition aufgenommene Kamerabild 5.12a wird einem errechneten Bild ohne angepasste fotometrische Parameter 5.12b gegenübergestellt. Es sind erhebliche Helligkeitsunterschiede zu sehen (5.12c).

Zur optimalen Einstellung der Parameter wird ein einfaches heuristisches Verfahren verwendet, welches in einer Anzahl an Iterationen, in einem festgelegten Wertebereich, die entsprechenden Lichtparameter zufällig bestimmt. Mit diesen Parametern wird das Kamerabild berechnet und nachfolgend die im Bereich des Scanobjektes (hier im Bereich der Kugel) auftretenden Intensitätswerte g_{virt} und g_{orig} pixelweise mit der originalen Ansicht (Bild 5.12a) verglichen und das Abstandsquadrat aufsummiert:

$$S = \sum_{u=1}^{1392} \sum_{v=1}^{1040} (g_{virt}(u, v) - g_{orig}(u, v))^2 \rightarrow Min \quad (5.14)$$

Der während der Iterationen auftretende Beleuchtungsparametersatz mit dem kleinsten Wert für S in Gleichung (5.14) kann manuell bewertet und im folgenden Berechnungsmodell verwendet werden. Es ist möglich, die zur Parameterbestimmung notwendigen Wertebereiche hinsichtlich der Bereichsgröße und der Diskretisierung (Schrittweite) der einzelnen Werte einzuschränken. Beispielsweise kann die Schrittweite beim diffusen und glänzenden Anteil auf $\frac{1}{100}$ gesetzt werden, beim umgebenden Lichtanteil sind Schritte im $\frac{1}{1000}$ Bereich sinnvoll. Der Glanzfaktor wird ganzzahlig verändert. Der Wertebereich der einzelnen Parameter ergibt sich

aus der Art der Oberflächenreflexion. Da die Kugel zwar aus Aluminium besteht, aber mit einem Entspiegelungsspray (auch Scanning-Spray genannt) weiß mattiert wurde, erscheint diese überwiegend diffus reflektierend. Folglich kann in erster Näherung angenommen werden, dass der Faktor dk_d deutlich größer ausfällt als der Faktor für die glänzende Reflexion sk_s . Im Fall der Kugel ist eine sehr flache Glanzstelle zu sehen, welche kleine Werte für den Glanzfaktor (n im Bereich [1..16], vgl. mit Diagramm A.4) erwartet. Der Anteil des umgebenden Lichtes a entsteht im umgebungslichtverschlossenen Scanraum des *kolibri Flex 100* nur durch Selbstreflexionen des Projektorlichtes an allen im Raum befindlichen (größtenteils schwarz mattierten) Gegenständen und ist somit sehr klein.

Bei Oberflächen, die etwas stärker glänzen, können die Werte für den glänzenden Anteil höher ausfallen. Ferner kann die Art der Glanzstelle durch größere Werte für den Glanzfaktor n abgebildet werden. Jedoch ist bei optisch weniger kooperativen Flächen die Aufnahme mittels Streifenprojektion schwierig. Längere Belichtungszeiten lassen sich durch proportional höhere Werte für die diffuse, glänzende und umgebende Reflexion abbilden.

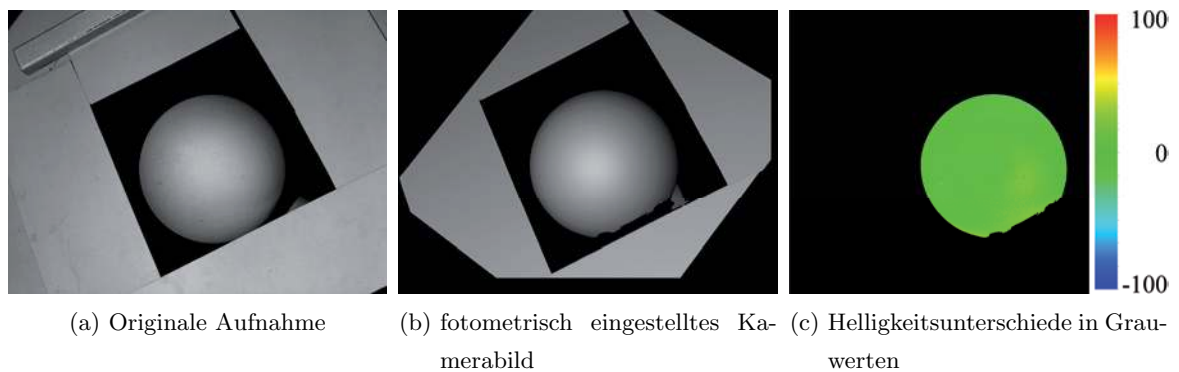


Abb. 5.13: Nach der Parametersuche liegt eine fotometrische Modelleinstellung vor, bei der die Helligkeitsunterschiede reduziert wurden.

Im Ergebnis der fotometrischen Kalibrierung (Abb. 5.13) liegt eine Helligkeitsverteilung auf dem Objekt vor, die in kleinen Bereichen vom Helligkeitsverlauf des Originals abweicht (Standardabweichung $(1 \cdot \sigma)$ bei 10 Grauwerten). Das hängt überwiegend mit dem verwendeten, nicht physikalisch plausiblen, Beleuchtungsmodell und der damit verbundenen ungenauen Beschreibung der Reflexion auf einer Materialoberfläche zusammen.

5.4 Zusammenfassung der Modellparameterbestimmung

Die in den letzten beiden Abschnitten dargestellte Lösung zur Parametrisierung des Scannermodells für die Erfassungsberechnung soll in der folgenden Tabelle 5.1 zusammengefasst werden. Die genannten Kategorien orientieren sich an denen in Tabelle 3.1 eingeführten Einordnungen. Nach der Parametrisierung des Systems sind nur die Scannerpositionen (Kategorie **C**, Tab. 3.1) während des Scannens variabel.

Tab. 5.1: Bestimmung der geometrischen Modellparameter der Kategorien **A** und **B** in Anlehnung an Tabelle 3.1, sowie der Lichtparameter (hier Kategorie **L**)

Kategorie	Variable	Bestimmung
A ¹	W, H	Die Auflösung des Bildsensors kann der Gerätedokumentation entnommen werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Bildauflösung den aufgenommenen Kamerabildern direkt zu entnehmen.
B ²	θ_h	Zum einen ist die Berechnung des Öffnungswinkels über die Angabe der Brennweite möglich. Zum anderen kann die Bestimmung über den Durchmesser der Kugelsilhouette der Testszene in der realen und errechneten Kameraansicht erfolgen.
	$near, far$	Die Schärfentiefe kann, soweit nicht angegeben, näherungsweise durch die Angabe der Messfeldgröße angegeben werden.
	$\mathbf{cp}_i^S, \omega_i^S, \varphi_i^S, \kappa_i^S$	Die Positionen und Orientierungen der Kameras können beim <i>kolibri Flex 100</i> den Kalibrierdaten des Scannersystems entnommen werden. Die Positionsdaten eines unkalibrierten Projektors müssen anhand der Kamerapositionen und dem geometrischen Aufbau des Scannkopfes näherungsweise angegeben werden.
L ³	$t(\mathbf{P}, \mathbf{L})$	Die entfernungsabhängige Helligkeitsabnahmefunktion kann durch die Angabe des Anstieges einer linearen Funktion $I(h)$ beschrieben und deren Parameter durch Abgleich des originalen zu errechnetem Helligkeitsverlauf an einem ebenen Element in der Testszene bestimmt werden.
	sk_s, dk_d, a und n	Die Parameter des verwendeten Beleuchtungsmodells können durch ein stochastisches Verfahren bestimmt werden. Als Kriterium gilt die Abweichung zwischen originalen und errechneten Helligkeitsverläufen auf dem zu erfassenden Objekt. Wichtig ist, dass diese Parameter für jeden Oberflächentyp sowie der verwendeten Belichtungszeit angepasst werden müssen.

¹ zur Lebenszeit des Scanners fixierte Parameter

² mit der Kalibrierung des Scanners fixierte Parameter einer Kamera bzw. eines Projektors (Index i)

³ Lichtparameter

5.5 Erfassung und Erfassungsplanung am Beispiel Verdichterschaufel

Am Beispiel der in Abbildung 4.2 dargestellten Verdichterschaufel soll exemplarisch ein bestehender Erfassungsplan mit dem beschriebenen Modell verbessert werden. Die Schaufel selbst ist ca. 8 cm lang und 4 cm breit und ist mit einer entsprechenden Vorrichtung im Messraum des Scanners eingespannt. Der Aufbau des Arbeitsraumes des Scanners mit dem Objekt ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die Oberfläche der Verdichterschaufel ist mit Entspiegelungsspray weiß mattiert.



Abb. 5.14: Verdichterschaufel im Scanraum des *kolibri Flex 100*.

Die Positionierung der Schaufel in der Einspannung ist in diesem Beispiel willkürlich gewählt, wobei darauf geachtet wurde, dass die strömungstechnisch relevante Vorderkante im erfassbaren Bereich liegt. Schwerpunkt der Optimierung soll es sein, dass ein Erfassungsplan generiert wird, bei dem der mit einem Referenzersfassungsplan erfasste Bereich mit weniger Aufnahmen erfasst wird.

Alle gewählten Modellparameter sind im Anhang A.7 aufgeführt.

Modellgenerierung Zu Beginn sind die genaue Position der Schaufel im Scannerkoordinatensystem, sowie die Geometrie und Lage der Einspannung unbekannt. Zur Optimierung ist jedoch eine bekannte Lage der Geometrien notwendig, weshalb die bekannte Schaufelgeometrie (hier in Form von CAD-Daten) entsprechend in der Modellszene positioniert werden muss. Die eingespannte Schaufel wird mit einem drehwinkelabhängigen Erfassungsplan (symmetrischer Standardplan, Gleichung (5.15)) mit jeweils acht Aufnahmen im oberen und acht Aufnahmen im unteren Drehkreis erfasst. Im Ergebnis liegt eine Punktwolke (Abb. 5.15a) der Szene vor, bei der ein Teil der Schaufel sowie Teile der Einspannung zu sehen sind. Diese Daten werden zu einem Dreiecksnetz (Abb. 5.15b) trianguliert und entsprechend in Schaufel (grün) und Einspannung (blau) segmentiert.

$$ErfP_{standard} = \begin{matrix} \langle -146^\circ; -104^\circ; -63^\circ; -21^\circ; 21^\circ; 63^\circ; 104^\circ; 146^\circ \rangle^{Oben} \\ \langle 146^\circ; 104^\circ; 63^\circ; 21^\circ; -21^\circ; -63^\circ; -104^\circ; -146^\circ \rangle^{Unten} \end{matrix} \quad (5.15)$$

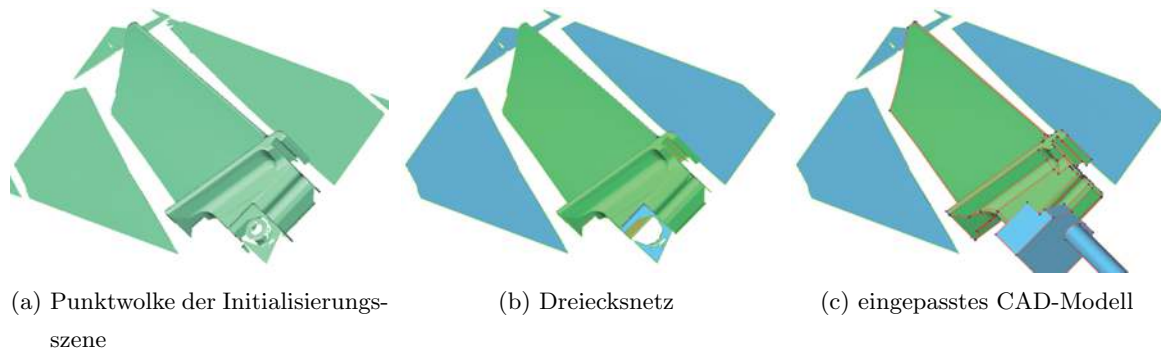


Abb. 5.15: Initialisierungsszene mit verschiedenen Datenrepräsentationen. Im Ergebnis des Scannens liegen Punktedaten 5.15a der Oberfläche vor, welche anschließend trianguliert werden 5.15b. Danach erfolgt die Einpassung der CAD-Daten 5.15c der Schaufel.

Nun erfolgt die Einpassung der Schaufelgeometrie an das Oberflächennetz des Scans mit einem Best-Fit-Algorithmus (Abb. 5.15c, bspw. mit der Software *Geomagic Studio*) um die Transformation vom Schaufelkoordinatensystem des CAD-Systems in das Koordinatensystem des Scanners zu berechnen.

Gleichzeitig erfolgt die Erstellung und Positionierung der Einspannungselemente, vorrangig im Fußbereich der Schaufel. Hierfür kann der Scandatensatz als Grundlage dienen, indem die erfassten Punkte zur Konstruktion und Positionierung definierter Elemente benutzt werden. Wichtig ist, dass alle Elemente im Modell berücksichtigt werden, welche einzelne Scannerpositionen verdecken können.

Netzauflösung Der positionierte CAD-Datensatz der Schaufel wird in ein Netz von Dreiecken umgewandelt (Abb. 5.16a), welche den notwendigen finiten Flächenelementen entsprechen. Diese sind in der Regel verschieden groß, da bei der Zerlegung der CAD-Flächenbeschreibung die Dreiecksgröße den lokalen Krümmungen angepasst werden.



Abb. 5.16: Verschiedene Netzauflösungen der Verdichterschaufel

Mit entsprechender Software (z. B. Geomagic Studio) lässt sich aus diesem Netz ein homogenes Dreiecksnetz erzeugen, bei welchem die Dreiecke sowohl näherungsweise gleich groß, als auch annähernd gleichseitig sind. Diese Homogenisierung (vgl. unterschiedliche Netzgröße in Abbildung 5.16b und 5.16c) ist unabhängig der Flächenkrümmung weshalb die Dreiecksanzahl je nach gewählter Elementgröße stark ansteigen kann. Die durchschnittliche Kantenlänge errechnet sich aus dem Bildmaßstab bei der mittleren Entfernung von Kamera zu Messfeldmitte zuzüglich einem Verkipfungswinkelanteil von $\gamma = 60^\circ$ nach Gleichung (3.10). Am Beispiel des *kolibri Flex 100* ergibt sich (Gleichung (5.16)) im 75er Messfeld ein durchschnittlicher Bildmaßstab von $0,1 \text{ mm}/\text{Pixel}$ (Bildausschnitt 140 mm , Sensorgröße 1392 Pixel , Abstand Sensor zur Messfeldmitte etwa 370 mm) und somit eine Elementgröße von $0,2 \text{ mm}/\text{Pixel}$ (gewählt zur Berechnung wurden $0,25 \text{ mm}/\text{Pixel}$).

$$l_{fin} = O \cdot \frac{1}{\cos(\gamma)} = 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{Pixel}} \cdot \frac{1}{\cos(60^\circ)} = 0,2 \frac{\text{mm}}{\text{Pixel}} \quad (5.16)$$

Das Dreiecksnetz der Verdeckungselemente kann auf ein Minimum von Dreiecken reduziert werden, da das Modell nur verdeckend wirkt. In diesem Beispiel wurde die gescannte Verdeckungsgeometrie behalten. Lediglich die Einspannungsgeometrie im Fußbereich wurde eingefügt.

Beleuchtungsparameter Die Anpassung der Beleuchtungsparameter erfolgt, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, durch ein stochastisches Anpassen der Kennwerte. In Abbildung 5.17 sind für eine Beispielsicht der Schaukel die Parameter entsprechend eingestellt, sodass ein überwiegend gleich ausgeleuchtetes Bild entsteht.

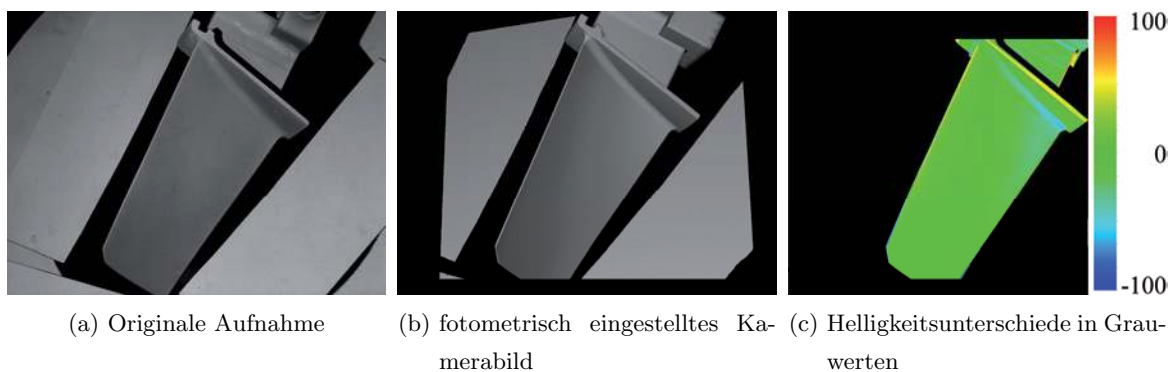


Abb. 5.17: Mit der Auswahl von geeigneten Beleuchtungsparametern erreicht man ein dem Original ähnliches Helligkeitsbild.

Beispielmessung am Referenzerfassungsplan Der zur Positionierung verwendete Erfassungsplan und dessen Scannergebnisse sollen zur Verifizierung des Berechnungsmodells genutzt werden. Dazu werden die aufgenommenen mit den berechneten Daten verglichen.

Die Berechnung der erfassten Flächen einer Scanneraufnahme ist exemplarisch mit der sechsten Erfassungsplanposition aufgeführt. Dazu wurden mit den jeweiligen Beobachtern (linke und rechte Kamera) sowie dem Projektor entsprechende Ansichten gerendert und gemäß Algorithmus 3.1 ausgewertet.

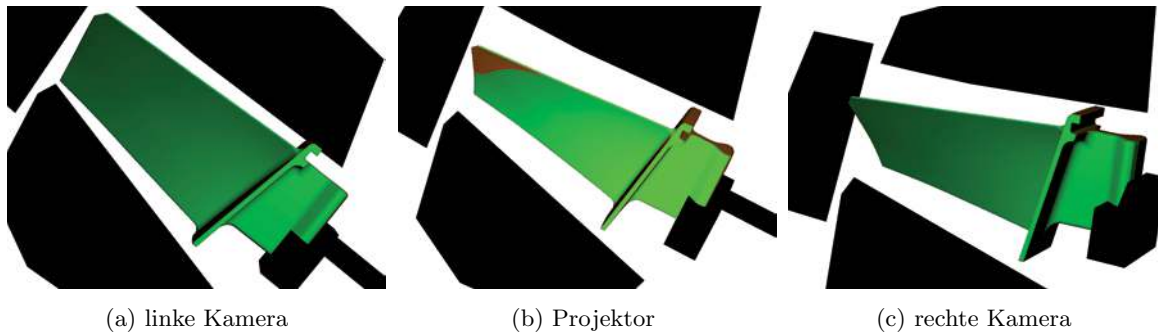


Abb. 5.18: Einzelansichten einzelner Beobachter. Die grünen Bereiche kennzeichnen den sichtbaren Bereich. Schwarze Flächen markieren die Einspannungselemente und rot gefärbte Bereiche sind schlecht beleuchtet bzw. sind zu steil zur Blickrichtung.

Dem Ergebnis entsprechend kolorierte Ansichten sind in Abb. 5.18 einzeln aufgezeigt, wobei die grünen Bereiche diejenigen darstellen, welche in der jeweiligen Perspektive als sichtbar erkannt wurden. Die Berechnung der Gesamtsichtbarkeit erfolgt durch die entsprechende Variante aus Tabelle 3.3 (zwei Kameras, Projektor). Zur Visualisierung des erfassten Bereiches ermöglicht das Scansystem *kolibri Flex 100* das Exportieren der Scanergebnisse der Einzelansichten in Form von Punktdaten. Diese Punktdaten sind in einer Matrix gespeichert, welche der Bildmatrix der linken Kamera entspricht. Somit lassen sich die erfassten Flächen in dem Ansichtsbild der linken Kamera darstellen.

Die Abbildungen 5.19a und 5.19b zeigen eine solche Darstellung für die untersuchte Einzelaufnahme des verwendeten Erfassungsplanes. Zu sehen ist in beiden Abbildungen (original sowie berechnet) ein Helligkeitsbild der linken Kamera in dem der, durch die Scannerposition erfasste Bereich grün unterlegt ist. Es lässt sich feststellen, dass sich im Bereich des Schaufelblattes die erfassten Flächenbereiche der berechneten Ansicht denen der real erfassten Bereiche stark ähneln. Die komplette Gegenüberstellung zwischen real gescannter Ansicht und errechneter Position befindet sich im Anhang, Tabelle A.6.

Nachfolgend ist das Ergebnis des kompletten Erfassungsplanes in Form der gescannten Oberfläche des Schaufelblattes als Vergleich zwischen der kompletten, zu erfassenden Geometrie (Abb. 5.20a), der mit dem Scansystem erfassten Geometrie (Abb. 5.20b) sowie der errechneten Geometrie (Abb. 5.20c) gegenüber gestellt.

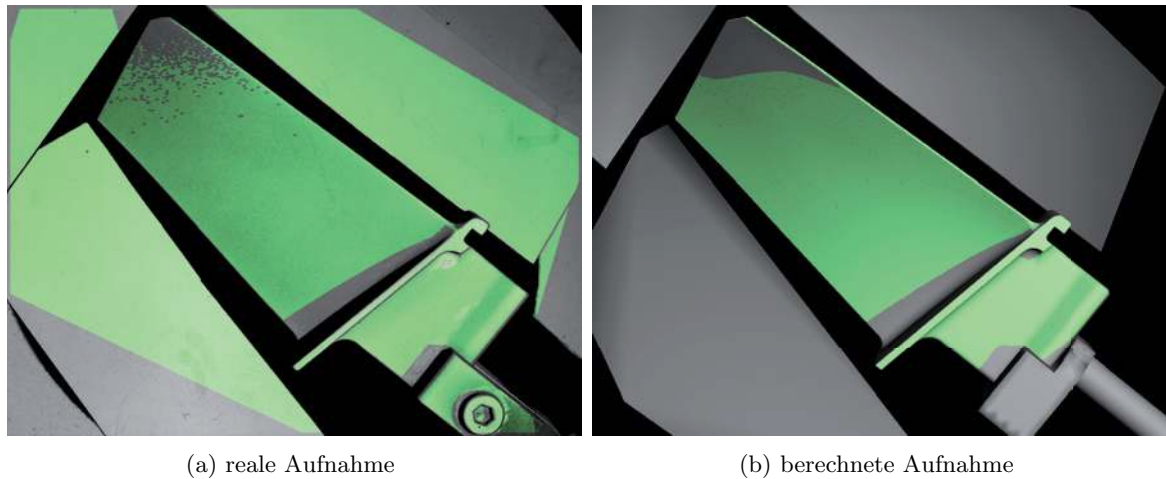


Abb. 5.19: Helligkeitsbilder einer Position des Erfassungsplanes mit grün hervorgehobenen, durch das Scannen erfassten Bereiches. Links ist das reale Bild der linken Kamera zu sehen, Rechts das korrespondierende berechnete Bild.



Abb. 5.20: Die Scanergebnisse des verwendeten, nicht optimierten Erfassungsplanes im Vergleich. Das real gescannte Ergebnis 5.20b

Die originale Oberfläche der Schaufel beträgt 7305 mm^2 . Davon wurden mit dem Scanner *kolibri Flex 100* etwa 5676 mm^2 erfasst. Das entspricht etwa $77,7 \%$ der zu erfassenden Fläche. Mit dem Berechnungsmodell wurden mit dem selben Erfassungsplan 5608 mm^2 der Schaufeloberfläche, also $76,8 \%$ erfasst. Folglich ergibt sich für dieses Beispiel eine Abweichung im Scanergebnis von $0,9 \%$. Die theoretisch erfassbare Fläche, welche bei dieser Einspannungsvariante möglich ist, wurde unter Verwendung aller möglichen Scannerpositionen (beide Drehkreise, ganzzahlige Winkel, im Bereich von -146° bis $+146^\circ$) errechnet, und ist 5875 mm^2 groß (Tabelle 5.2).

5.5.1 Optimierung

Der oben verwendete Standardmessplan erfasst mit insgesamt 16 Einzelaufnahmen etwa 77% der zu erfassenden Oberfläche. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Schaufel nur von einer Seite erfasst wird. Daraus resultiert die Annahme, dass ohne den Wechsel der Einspannung ein vollständiges Erfassen der Schaufel nicht möglich ist. Trotzdem lassen sich zwei

Tab. 5.2: Übersicht über die erfassbaren Flächenanteile am Beispiel der Verdichterschaufel

Erfassungsvariante	erfasster Flächeninhalt
Gesamte Oberfläche der Verdichterschaufel (CAD-Modell)	7305 mm^2
In beschriebener Einspannung mit dem Scanner <i>kolibri Flex 100</i> erfasster Oberflächenbereich ¹	5676 mm^2
Mit dem Berechnungsmodell errechneter Flächeninhalt des Objektes ¹	5608 mm^2
Maximal erfassbarer Flächeninhalt der Schaufel in dieser Einspannung ²	5875 mm^2

¹ Mit dem Standarderfassungsplan

² Jede mögliche Position des Scanners wird zur Erfassung genutzt. Dabei kommen ganzzahlige Positionen im oberen, wie unteren Drehkreis zum Einsatz.

Fragestellungen mit dem Ziel einer Optimierung formulieren.

- Welcher Flächenanteil kann maximal mit dieser Einspannungsvariante gescannt werden?
- Ist es möglich, bei gleicher Einspannung, ein etwa gleichwertiges Untersuchungsergebnis mit weniger Einzelaufnahmen zu erfassen?

Die erste Fragestellung hat weniger praktische Relevanz, da die Schaufeloberfläche bereits zu 77 % der gesamten Schaufel sowie im Vergleich zum maximal möglichen Flächeninhalt in dieser Einspannung bereits 95 % (5608 mm^2 von 5875 mm^2) erfasst wurde. Es ist wahrscheinlich, dass in einer anderen Einspannung (von der Rückseite aus) der fehlende Teil, exklusive des eingespannten Bereiches im Schaufelfuß, erfasst wird. Auch die Bewertung der bisher erfassten Oberfläche lässt diesen Schluss zu, da überwiegend Bereiche fehlen, die auf der dem Scanner abgewandten Seite liegen.

Die zweite Fragestellung ist hinsichtlich einer Mehrfachmessung gleichartiger Bauteile interessant. Reduziert sich die Anzahl an Einzelaufnahmen, sinkt die Erfassungszeit, was dazu führt, dass eine größere Anzahl an Verdichterschaufeln in gleicher Zeit erfasst werden kann.

Die Optimierung erfolgt mit einer Variante der vorgestellten *Evolutionärer Algorithmen* (Abschnitt 4.3). Ein Erfassungsplan beschreibt einen Chromosomensatz eines Individuums, wobei die Winkelpositionen des Drehtellers der jeweiligen Einzelaufnahmen die Chromosomen des Individuums darstellen. Eine Gruppe von Individuen wird in einer Population zusammengefasst. Eine Population an einem bestimmten Zeitpunkt der Optimierung wird Generation genannt.

5.5.2 Randbedingungen

Als wesentliche Einschränkung gilt der begrenzte einstellbare Positionsumfang. Der Scanner kann auf zwei Kreisbahnen um das Objekt bewegt werden, wobei nur ganzzahlige Winkeldefinitionen zulässig sind. Die Ausprägung der einzelnen Drehwinkel begrenzt der Messbereich des Scanners von -146° bis $+146^\circ$.

Des Weiteren sind nur Erfassungspläne nutzbar, bei denen eine ausreichende Anzahl (mind. vier) an Messungen im oberen Drehkreis vorhanden ist. Dies ist notwendig, um die Drehachse des Systems und nachfolgend das Ergebnis-Koordinatensystem zu berechnen (siehe Oben, vgl. hierzu [IVB06, Kru09]). Ferner sollen Pläne verwendet werden, bei denen die Anzahl an Messungen im oberen, wie unteren Drehkreis gleich groß ist. Um Erfassungspläne zu vermeiden, bei denen Drehwinkel (Scanpositionen) zu dicht beieinander liegen, soll weiterhin ein Mindestabstand zwischen zwei Messungen definiert werden. Daraus ergeben sich folgende Randbedingungen, welche in Tabelle 5.3 zusammengefasst dargestellt sind.

Tab. 5.3: Randbedingungen für die Optimierung

Nummer	Parameter	Wertebereich bzw. Ausprägung
1	Gesamtdrehwinkel n_{gesamt}	Mindestens acht, Vielfachenmenge von 2
2	Drehwinkel im oberen Drehkreis n_{oben}	$\frac{1}{2} \cdot \text{Gesamtdrehwinkel}$
3	Drehwinkel im unteren Drehkreis n_{unten}	$\frac{1}{2} \cdot \text{Gesamtdrehwinkel}$
4	Wertebereich Drehwinkel	-146° bis $+146^\circ$
5	Mindestabstand zwischen zwei Drehwinkeln d_{min}	10°

5.5.3 Fitnessfunktion und Umgang mit Randbedingungen

Sowohl die genannten Optimierungsziele als auch die beschriebenen Randbedingungen müssen in der Optimierungsstrategie als auch in der Fitnessfunktion Einfluss finden. Dabei wird die Fitnessfunktion aus der in Abschnitt 4.2 (*Optimierungsziele*) eingeführten Zielfunktion (Gleichung 4.2) abgeleitet. Daraus resultiert ein Fitnesswert f_{Ind} , der durch Aufsummieren gewichteter Flächeninhalte (Wichtungsfaktor γ) der erfassten finiten Flächenelemente A_{finE}^+ über den kompletten Erfassungsplan $EerfP$ errechnet wird, wobei jedes Element nur einmal gezählt wird:

$$f_{Ind}(EerfP) = \sum \gamma A_{finE}^+ \quad (5.17)$$

Diese Fitnessfunktion liefert einen Wert, der äquivalent zur Güte eines Individuums ist. Dabei gilt: je größer die Fitness, desto besser ist das Individuum. Die Wichtung der finiten

Flächenelemente ermöglicht die Berücksichtigung unterschiedlicher Schwerpunkte in der Erfassung von Bereichen eines Objektes. Bspw. können Funktionsflächen eine höhere Wichtung erhalten, um eine Optimierungspriorität festzulegen. Im nachfolgenden Beispiel ist der Wichtungsfaktor $\gamma = 1$.

In der Fitnessfunktion sollen sich ferner Verstöße gegen die gestellten Randbedingungen widerspiegeln. Zwar können Erfassungspläne, welche Randbedingungen verletzen aus der Population gelöscht werden, jedoch sinkt besonders bei vielen ungültigen Individuen die Suchdynamik. Eine tolerantere Methode stellt das Einführen einer Straffunktion dar [Wei07].

Am Beispiel wird ein von f_{Ind} abhängiger Straffaktor t_s gebildet (Bspw. $t_s = 0.05 \cdot f_{Ind}$). Im Fall, dass die Anzahl der Aufnahmen nicht gleichmäßig auf die beiden Drehkreise verteilt ist, wird die Differenz mit dem Straffaktor multipliziert und von der Fitness des Individuums f_{Ind} abgezogen:

$$f_{Ind} = f_{Ind} - t_s \cdot \left| \left(n_{oben} - \frac{1}{2} n_{gesamt} \right) \right| \quad (5.18)$$

Der Erfassungsplan wird ferner nach dem kleinsten Abstand d_k zwischen zwei Scannerpositionen (Drehwinkel) abgesucht. Ist dieser Abstand kleiner als der Mindestabstand d_{min} wird entsprechend Gleichung (5.19) der Fitnesswert gesenkt.

$$f_{Ind} = f_{Ind} - t_s \cdot |(d_{min} - d_k)| \quad (5.19)$$

Somit werden Individuen (Erfassungspläne), welche gegen die gesetzten Randbedingungen verstoßen in ihrer Fitness geschwächt, ohne sie direkt aus der Evolution auszuschließen.

5.5.4 Methoden

Die Optimierung eines Erfassungsplanes selbst läuft nach den Grundmechanismen der EA. Der Ausgangspunkt stellt eine zufällig generierte Population mit einer Anzahl p an Individuen dar. Die Bestimmung der jeweiligen Ausprägungen (Scanpositionen) eines Chromosomensatzes erfolgt dabei gleichverteilt im zulässigen Wertebereich. Es folgt die Bewertung eines jeden Individuums innerhalb der Population.

Nun wird fortlaufend ein Zyklus gestartet, bei dem durch Rekombination, Mutation und Selektion, Nachfolgegenerationen generiert werden. Das geschieht solange, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist (Anhang - Algorithmus A.1).

Nachfolgend sind die genutzten Mechanismen der evolutionären Algorithmen dargestellt. Es sind jedoch eine Vielzahl anderer Implementierungen möglich. Hierzu wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen, bspw. [Wei07, SHF94, Hol75, LES08, FOW66].

Codierung eines Erfassungsplanes in einem Individuum Sowohl die Drehtischangabe als auch die Drehtischposition wird in einem Array aus Zahlen im Bereich $[0..586]$ codiert. Dabei entsprechen die Werte $[0..292]$ den Positionen $[-146^\circ..146^\circ]$ im oberen Drehkreis, die Zahlen $[293..585]$ den Winkeln im unteren Drehkreis (Abb. 5.21).

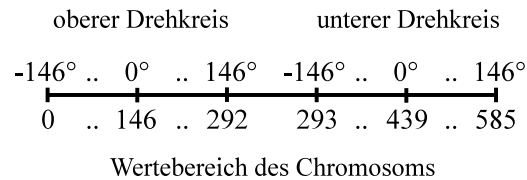


Abb. 5.21: Codierung der Winkelpositionen im Chromosom

Rekombination Bei der Rekombination wird für ein Individuum entschieden, ob es Nachkommen generieren soll. Die Auswahl erfolgt mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit (Rekombinationsfaktor im Bereich $[0..1]$), der Partner ist das jeweilige Nachbar-Individuum der Population. Die Nachkommenbildung erfolgt durch das sog. Crossover. Dabei wird der Chromosomensatz an zufälliger Stelle geteilt und die entstehenden Teile neu kombiniert (Abb. 5.22).

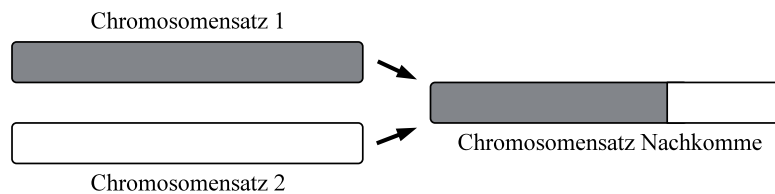


Abb. 5.22: Rekombination durch Crossover zweier Individuen zum Erzeugen eines Nachkommens

Mutation Die Mutation erfolgt ebenfalls mit einer definierten Wahrscheinlichkeit (Mutationsfaktor im Bereich $[0..1]$). Soll ein Individuum mutieren, dann wird an einer zufälligen Stelle des Chromosomensatzes ein neues Chromosom aus dem zulässigen Wertebereich generiert und das alte überschrieben (Abb. 5.23).

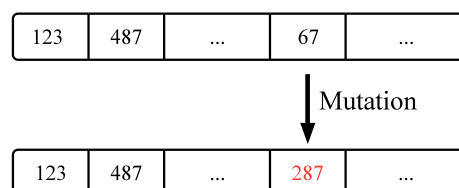


Abb. 5.23: Mutation eines Chromosoms durch zufälliges Generieren der Ausprägung

Selektion Die Population, welche aus den Individuen der alten Generation sowie aus den generierten Nachkommen besteht, muss wieder auf die gesetzte Populationsgröße p reduziert werden. Dazu werden bestimmte Individuen selektiert und in die neue Generation übernommen. Die Selektion erfolgt dabei durch ein rangbasiertes Auswahlverfahren. Anders als bei der Eliteselektion (nur die besten Individuen kommen weiter), ist die Wahrscheinlichkeit des Weiterkommens proportional zum Rang² des Individuums in der Population. Zwar können gute Individuen wieder gelöscht werden, jedoch sinkt dabei das Risiko in lokalen Extrema hängen zu bleiben (Vergleiche hierzu A.5).

Abbruchkriterium Um die Optimierungsiteration nicht unendlich lange laufen zu lassen, sind Bedingungen festzulegen, bei deren Erfüllung die Optimierung abgebrochen wird. Dazu gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, aus denen folgende vier Varianten genutzt werden.

- **Mindestfitness** ist erreicht. Das bedeutet, dass mindestens ein Individuum die angegebene Fitness erreicht haben muss.
- Der **Fitnessabstand** zwischen dem Besten und dem Populationsdurchschnitt ist zu klein ($\text{Abstand} \leq \text{Grenzwert}$).
- **Unveränderte Fitness** über einen längeren Zeitraum.
- Die **maximale Laufzeit**, festgelegt durch eine Generationenanzahl wird überschritten.

Übergeordnete Iteration zur Minimierung der Einzelaufnahmen Für die Optimierung der Anzahl an Einzelpositionen in einem Plan wird die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Strategie, die Anzahl an Einzelaufnahmen pro Erfassungsplan iterativ zu verkleinern, auch am Beispiel der Verdichterschaufel angewandt. Begonnen wird mit der Aufnahmeanzahl n_{gesamt} des Standardplanes. Wird die geforderte Fitness (siehe Abbruchbedingung) erreicht, wird die Optimierung abgebrochen und die Anzahl n_{gesamt} um zwei verringert und erneut optimiert (Anhang - Algorithmus A.2).

5.5.5 Optimierungsergebnisse Verdichterschaufel

Als Ausgangspunkt der Optimierung wurde der Standarderfassungsplan (insg. 16 Erfassungspositionen) mittels EA optimiert. Dabei lag die Wahrscheinlichkeit zur Rekombination bei 80 %, die Mutationsrate bei 60 %. Die Anzahl an Individuen innerhalb der Population beträgt 51. Das Abbruchkriterium liegt bei 50 Generationen.

Bereits in Tabelle 5.2 wurde ein maximal möglicher Flächeninhalt angegeben, der sich mit dem Modell unter Verwendung aller möglichen Drehtischpositionen errechnen lässt. Diese wird

²Als Rang eines Individuums ist die Wertigkeit seiner Fitness gemeint

als maximal erreichbare Fitness angesehen und nachfolgend mit den tatsächlich errechneten Fitnesswerten verglichen. Die Fitnesswerte der besten Individuen einer Generation, sowie die durchschnittliche Fitness der Population während der Optimierung sind in Abbildung 5.24 aufgezeigt. Eingetragen ist ebenfalls die Fitness des Standardplanes gegenüber der maximalen Fitness (entspricht 95 %).

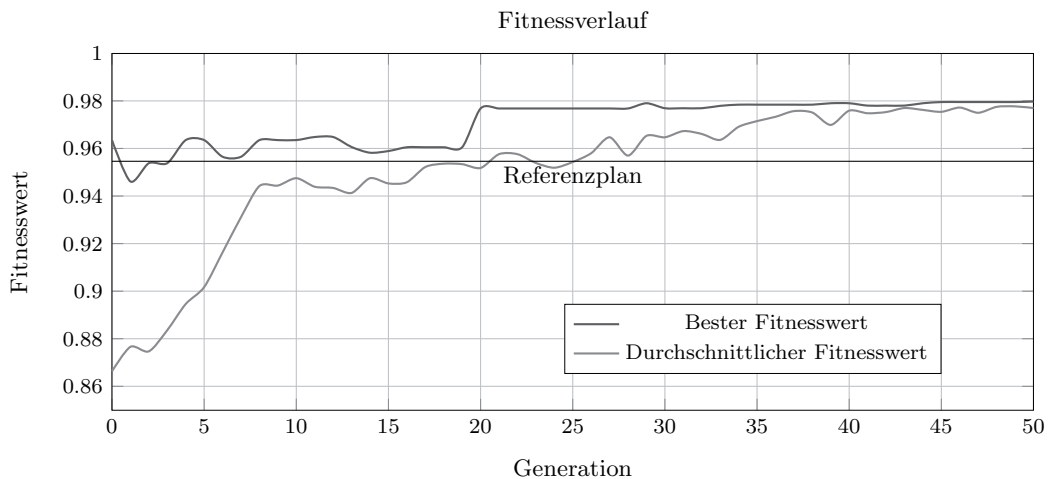


Abb. 5.24: Fitnessverlauf während der Optimierung. Die Fitness wird gegen die maximale Fitness verglichen. Eingetragen ist ebenfalls der Fitnesswert des Referenzerfassungsplanes.

Zu sehen ist, dass sich die Fitness im Laufe der Optimierung verbessert. Der Fitnesswert des besten Individuums der Generation 50 liegt bei etwa 98 % des maximal möglichen Wertes, eine Verbesserung von ca. 3 % gegenüber dem Standarderfassungsplan. Die zwischenzeitlichen Einbrüche der Fitness lassen sich auf das Selektionsverfahren (rangbasiert) zurückführen. Im Bereich ab Generation 45 entspricht die durchschnittliche Fitness annähernd der des Besten. Es ist zu folgern, dass die Population sehr homogen ist, und keine deutliche Verbesserung mehr eintritt. Ausgewählte Generationen (Startgeneration, Generation 25 und Generation 50) sind im Anhang A.8 entsprechend dargestellt.

Dabei stellt das beste Individuum nur eine Lösung dar. Bei wiederholtem Start der Optimierung entstehen jeweils unterschiedliche Erfassungspläne mit jeweils gleichwertiger Fitness. Für drei Wiederholungen sind die jeweils besten Individuen in den Abbildungen 5.25a bis 5.25c dargestellt.

Um die Anzahl der Einzelaufnahmen zu minimieren, erfolgt die iterative Verkleinerung des Chromosomensatzes, solange, bis die geforderte Fitness des Standardplanes unterschritten wird. Begonnen wird mit 16 Einzelpositionen.

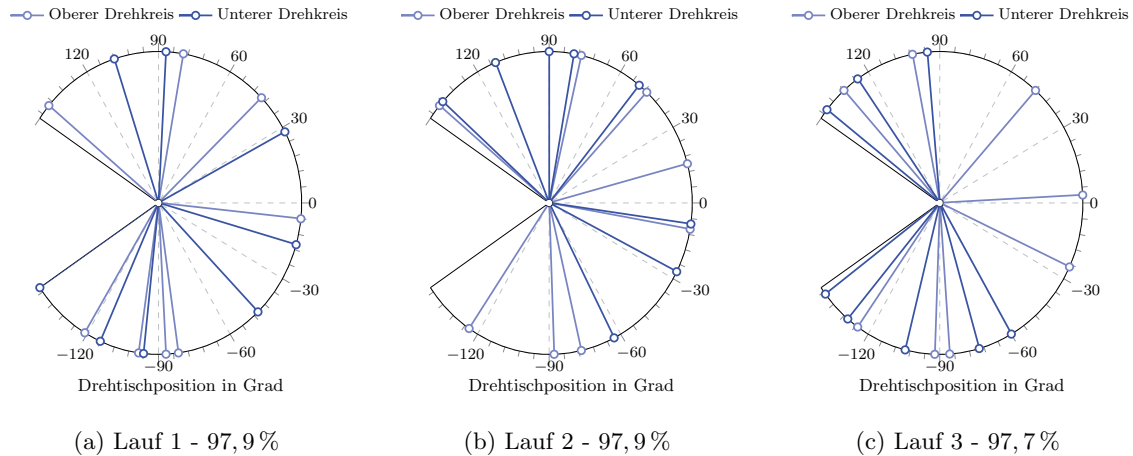
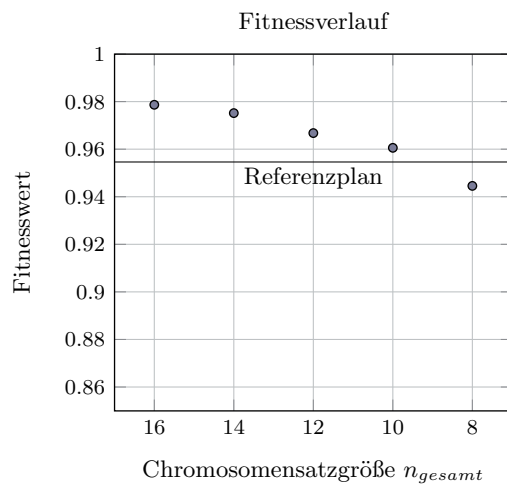
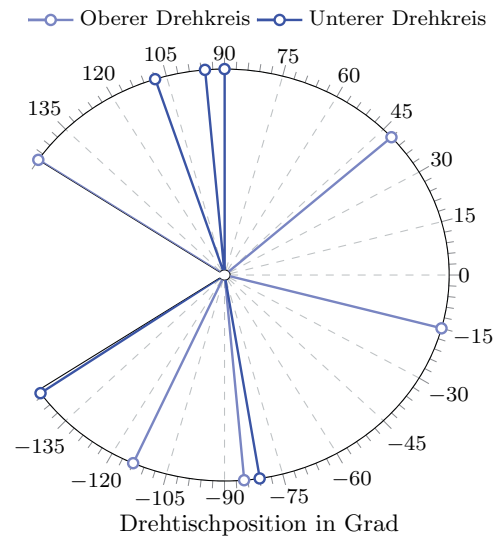


Abb. 5.25: Beste Individuen verschiedener Optimierungsdurchläufe

In Abbildung 5.26a ist der Fitnesswert des jeweils besten Individuums³ über der entsprechenden Chromosomensatzgröße aufgetragen. Chromosomensätze mit mehr als 10 Einzelaufnahmen fallen dabei immer besser aus, als der Standarddatensatz. Erst mit 8 Einzelaufnahmen wird der Mindestfitnesswert unterschritten. In Abbildung 5.26b ist ein optimierter Erfassungsplan mit nur 10 Einzelaufnahmen dargestellt.



(a) Iterative Fitnessänderung



(b) Bestes Individuum $n_{gesamt} = 10$

Abb. 5.26: Iterative Optimierung der Positionsanzahl

³Genaugenommen ist es ein Mittelwert des besten Individuums aus drei Optimierungsläufen mit angegebener Chromosomensatzzahl n_{gesamt}

Vergleich mit dem Ergebnis des kolibri Flex 100 Der optimierte Erfassungsplan wird anhand der realen Verdichterschaufel mit dem *kolibri Flex 100* verifiziert. Dabei ist eine deutliche Performancesteigerung beim Scannen zu beobachten. Neben einer leichten Verbesserung hinsichtlich der erfassten Fläche um etwa 2 % verkürzte sich die Aufnahmezeit⁴ von 22 min auf 13 min (Tabelle 5.4). Das kommt einer Verkürzung von 41 % gleich.

Tab. 5.4: Vergleich der Scanergebnisse mit und ohne Optimierung

	Standardplan	optimierter Erfassungsplan
Erfassungszeit [min]	22	13
Aufgenommene Punkte	2635000	2737000
Erfasste Oberfläche ¹	5676 mm ²	5764 mm ²

¹ Flächeninhalt der triangulierten Punktwolke

Abbildung 5.27 zeigt sowohl eine Ansicht der triangulierten Ergebnispunktwolke mit dem Standarderfassungsplan, als auch mit dem optimierten Erfassungsplan. Zu sehen ist eine Zunahme der gescannten Fläche im Bereich des Fußes sowie im Übergangsbereich des Blattes auf die Plattform.

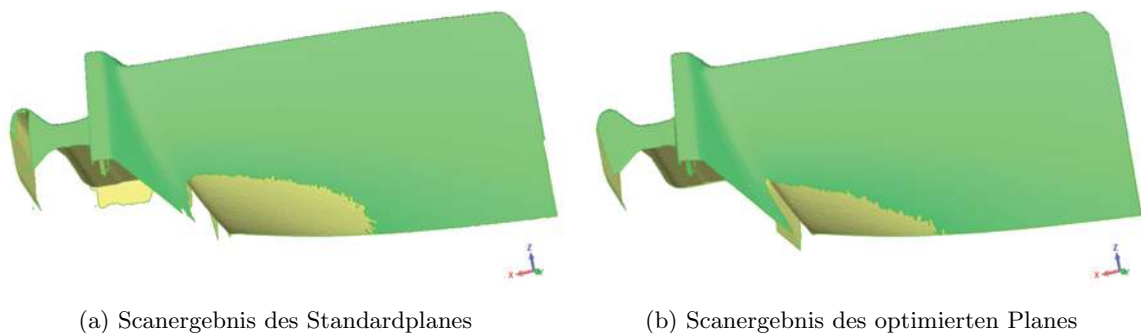
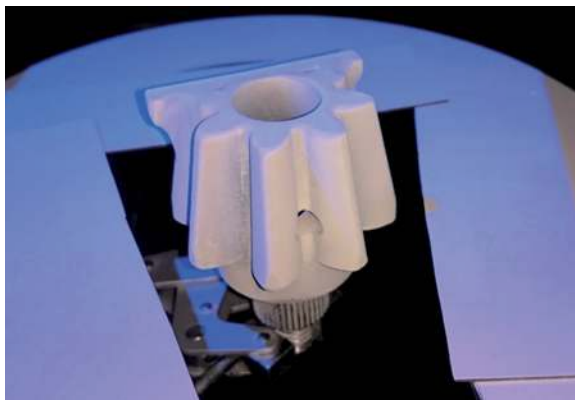


Abb. 5.27: Gegenüberstellung von Standard- zu optimiertem Erfassungsplan am Scanergebnis des realen Scanners *kolibri Flex 100*. Zu sehen ist insbesondere die Zunahme der erfassten Fläche im Fussbereich des Objektes.

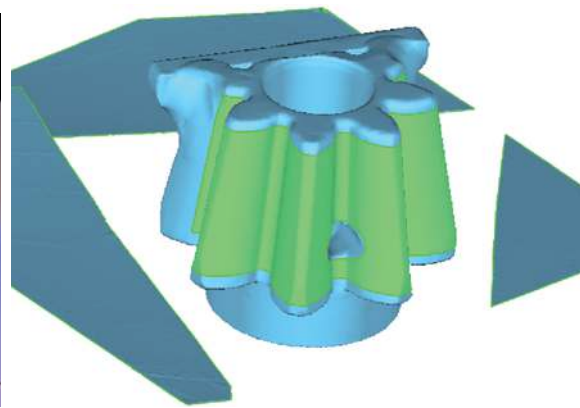
⁴Die Zeit vom Start des Scannens bis zum Sichern der gemeinsamen Punktwolke.

5.6 Optimierung am Beispiel eines Halbritzels

Im zweiten Beispiel soll die Zahnradlauffläche eines Halbritzels (Abb. 5.28a) aus einem Kegelaradgetriebe erfasst werden. Dies kann notwendig sein, um eventuelle Fertigungsschwankungen oder Verschleiß- und Schädigungserscheinungen zu untersuchen. Dabei muss nicht die gesamte Fläche des Zahnrades erfasst werden, sondern nur der interessierende Teil. Dazu wurde das Modellobjekt entsprechend aufgeteilt und der nicht zu erfassende Bereich als Verdeckungsobjekt interpretiert (Abb. 5.28b).



(a) Eingespanntes Halbritzel im Scanner



(b) Szene mit festgelegten Scanbereich

Abb. 5.28: Szene mit dem zu erfassendem Halbritzel

Aufgrund der Einspannung des Bauteils kann die zu erfassende Fläche mit dem Standardmessplan (16 Einzelmessungen, (5.15)) bereits vollständig erfasst werden. Daraus resultiert das Optimierungsziel, die Anzahl der Einzelaufnahmen zu minimieren⁵. Im Ergebnis, mit den unter Abschnitt 5.5.2 genannten Randbedingungen, entsteht ein Erfassungsplan mit 12 statt 16 Einzelaufnahmen (die entsprechenden Ergebnisse sind im Anhang A.9 aufgeführt).

Es hat sich gezeigt, dass die Aufnahmen des oberen Drehkreises kaum Daten liefern. Grund dafür ist, dass die interessierenden Flächen sehr schräg zur Aufnahmerichtung liegen und somit nicht erfasst werden. Zwar lassen sich Erfassungspläne ohne Aufnahmen aus dem oberen Drehkreis systembedingt nicht realisieren, jedoch lässt sich am Modell nachweisen, dass sich durch Ignorierung der Randbedingungen 1, 2 und 3 aus Tabelle 5.3 die relevante Fläche mit nur 6 Aufnahmen aus dem unteren Drehkreis erfassen lässt (Abb. 5.29b und 5.29c).

⁵Die Parameter für die Netzgröße, den Optimierungsalgorithmus, etc. bleiben gleich. Die Beleuchtungsparameter wurden entsprechend angepasst.

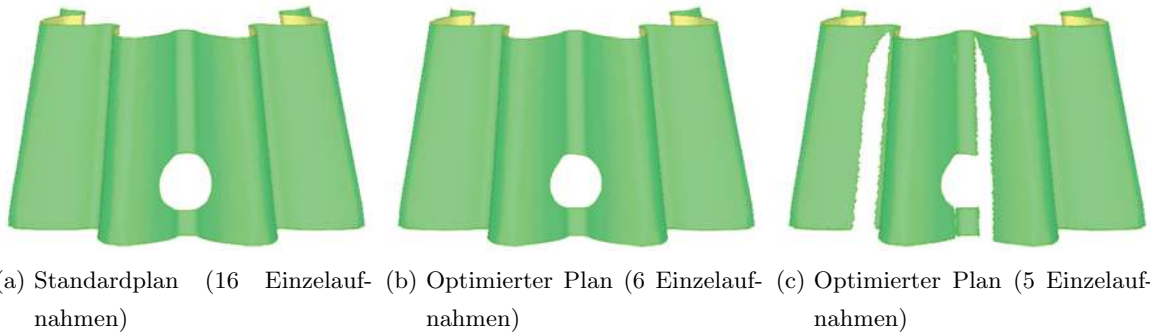


Abb. 5.29: Die relevanten Flächen lassen sich vollständig mit dem Standarderfassungsplan erfassen 5.29a. Durch die Optimierung lässt sich die Fläche mit nur sechs Aufnahmen bestimmen 5.29b. Die Reduzierung auf 5 Aufnahmen bringt bereits erste Fehlstellen 5.29c.

6 Auswertung und Ausblick

Nach der Beschreibung der notwendigen Grundlagen wurde in der vorliegenden Arbeit ein Modell entwickelt, welches anhand einer bekannten Geometrie eines Objektes und der Systemkenntnis eines Streifenprojektionssensors Erfassungspläne generiert. Diese Pläne werden simuliert und ermöglichen dadurch eine Optimierung hinsichtlich der verwendeten Einzelaufnahmen sowie der erfassten Oberfläche. Im Ergebnis lassen sich wiederholende Messungen von gleichen Bauteilen (Mehrfachmessungen) effektiver ausführen und somit Zeit und Kosten sparen. Im letzten Teil der Arbeit wurde gezeigt, mit welchen Mitteln das Modell an einem realen Scanner angepasst wird. Abschließend wurde die Erfassung und Optimierung an Beispielbauteilen evaluiert.

6.1 Auswertung

Das Modell zur Berechnung der Einzelansichten nutzt die projektive Mathematik (Seite 19 ff. und Seite 54 ff.) um den Bereich eines Objektes zu bestimmen, den ein Beobachter erkennen kann. Dazu ist die genaue Kenntnis der Beobachterposition und Orientierung über dem Objekt, sowie der Projektionseigenschaften nötig. Hierfür müssen Scannerinformationen vorhanden sein, die bei manchen kommerziellen Systemen nicht zugänglich sind. Folglich müssen alternative Wege (eigene Kalibrierung, Iterative Bestimmung, etc.) gefunden werden, um die entsprechenden Informationen zu erhalten.

Die Berücksichtigung der Beleuchtungssituation um Glanzstellen, dunkle bzw. unterbelichtete Bereiche u.ä. zu beschreiben, wurde mit einem einfachen, aber nicht physikalisch fundiertem Modell beschrieben (Seite 65 ff.). Vorteil dabei ist, dass mit wenigen Parametern die Lichtsituation in einem geschlossenen Scanraum beschreibbar ist und auch der Berechnungsaufwand gering ist. Zudem ist die Einstellung der Parameter nicht von fotometrischen Messungen am Bauteil abhängig, sondern lässt sich iterativ an das reale Helligkeitsbild anpassen. Somit steigt die Zugänglichkeit des Verfahrens auf Kosten der physikalischen fotometrischen Modellierung. Dem gegenüber ist diese Beschreibung nur bei weiß mattierten Objekten anwendbar. Glänzende Objekte könnten zwar annähernd beschrieben und berechnet werden, jedoch kann ein realer Vergleich nicht stattfinden, da das Streifenprojektionsverfahren bei optisch nicht kooperierenden Objekten versagt. Auch andere optische Materialeigenschaften (anisotrope Reflexion, Transparenz, Farben, etc.) werden nicht berücksichtigt. Abbildung 6.1 zeigt bei einer Verdichterschaukel, welche teilweise verschmutzt und nicht geweißt ist, dass ein Anpas-

sen der Parameter nicht möglich ist. Eine deutliche Verbesserung stellt das Unterteilen des Objektes in Einzelnetze (Zusammenfassen von Dreieck-Ids zu Gruppen mit gleichen fotometrischen Parametern) und die individuelle Angabe der Beleuchtungsparameter dar. Jedoch bleibt die mathematische Beschreibung der Reflexion ohne physikalische Grundlage.

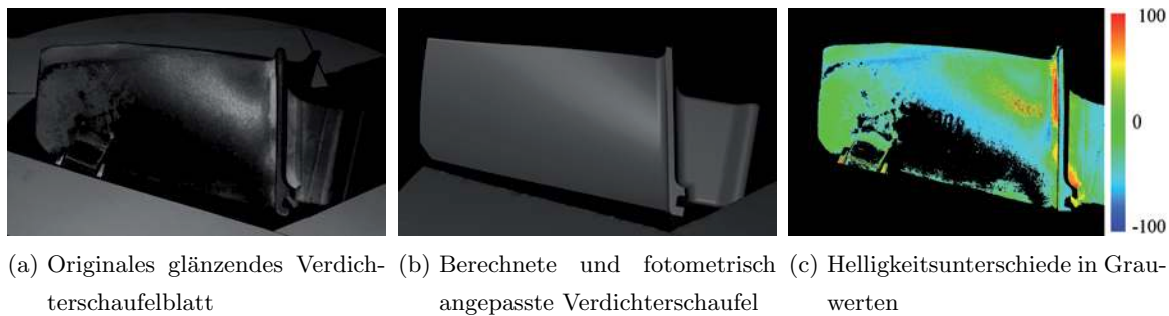


Abb. 6.1: Lichtparametrisierung an glänzenden Bauteilen. Die reale Verdichterschaufel ist erheblich verschmutzt und teilweise beschädigt. Auch die Farbe der Schaufel ist inhomogen. Ohne das Objekt entsprechend weiß zu mattieren, ist die Anpassung der Beleuchtungsparameter nicht möglich.

Die zu berechnenden Modelloberflächen werden durch Dreiecksnetze beschrieben, deren Netzstruktur homogen und die Größe der Dreiecke an die Sensorauflösung angepasst sein muss. Dabei wird zwischen zu erfassenden Objekten und Verdeckungsobjekten unterschieden (Seite 62 ff.). Bei der Anpassung des Netzes muss abgewägt werden, ob ein hoher Detailgrad mit kleinen Dreiecken Ungenauigkeiten in schräg zum Beobachter liegenden Bereichen rechtfertigen (Abb. 6.2). Jedoch ist es mit einem an die Sensorauflösung angepasstem Netz möglich, komplexe Objekte mit sehr vielen Selbsthinterschneidungen zu berechnen und einen entsprechenden Erfassungsplan abzuleiten.

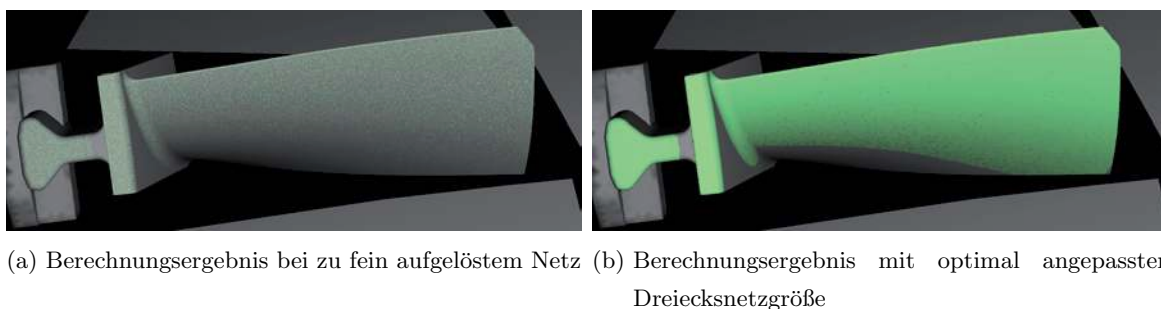


Abb. 6.2: Einfluss der Netzauflösung auf das berechnete Ergebnis. Die Berechnung auf der Grafikkarte ermöglicht nur die Zuordnung eines Dreieck-Codes pro Pixel. Ist das Netz zu fein, liegen mehrere Dreieck-IDs in einem Pixel. Die Folge: Nur eines ist sichtbar, der Rest nicht (Verletzung des Abtasttheorems).

Die Implementierung des Modells erfolgte auf der Grafikkarte eines PC-Systems, um detaillierte Objekte mit komplexen Verdeckungssituationen mit ausreichender Geschwindigkeit berechnen zu können. Am Beispiel der Verdichterschaufel mit 300 000 Dreiecken und zusätzlichen 12 000 Dreiecken für die Beschreibung der Einspannungselemente erfolgt eine Berechnung und Auswertung einer Einzelansicht (2 Kameras, 1 Projektor) in 0,5 Sekunden¹.

Die Beschreibung eines Erfassungsplanes erfolgt ausschließlich durch die Angabe der Scannerposition- und Orientierung (Seite 78). Dem zu Grunde liegt die genaue Kenntnis der Lage der im Sensor verbauten Beobachter (Kameras, Projektor). Am Beispiel des Scanners *kolibri Flex 100* besteht der Erfassungsplan aus den Winkeln des Drehtisches, sowie aus der Angabe des Drehkreises. Somit sind die Pläne ohne Konvertierung nutzbar. Um optimale Ergebnisse zu erhalten, wird der Erfassungsplan entsprechend seinem errechneten Scannergebnisses bewertet und entsprechend verändert. Die Optimierungsbeispiele bestätigen das hohe Optimierungspotential der Erfassungspläne. Am Beispiel der Verdichterschaufel verkürzte sich die am Scanner nachgewiesene Aufnahmezeit um 41 %. Es ist davon auszugehen, dass die Erfassungszeit bei gegebenem Optimierungsziel weiter verkürzt werden kann, wenn der Sensor frei über dem Objekt positionierbar wäre und somit die Drehkreisbeschränkung wegfiel.

Das Modell wurde am Beispiel des Scanners *kolibri Flex 100* verifiziert (Seite 87 ff.). Dabei wurde eine Methode vorgestellt, den für den Nutzer nicht zugänglichen Bildöffnungswinkel über den Bildmaßstab bei bekannten Kamerapositionen näherungsweise zu bestimmen. Über die Zuordnung des Erfassungsplanes zu den entsprechenden Positionsangaben und den Orientierungswinkeln der Kameras, kann das Scannerkoordinatensystem mit den Kamerapositionen vollständig bestimmt werden. Nachteilig zeigt sich hier die Ungenauigkeit der Drehtischpositionierung durch den Riemenantrieb von bis zu drei Grad (vgl. Positionen und Winkel in den Tabellen aus Abschnitt A.3).

Die zur Beleuchtungsberechnung notwendigen Parameter wurden im Beispiel ebenfalls bestimmt. Diese sind nur für die entsprechende Belichtungszeit des Scannersystems gültig und müssen bei anderer Lichtsituation neu bestimmt werden. Hinsichtlich der Beleuchtung ist zu sagen, dass die im Modell relevante Projektorposition nicht genau bestimmt werden kann, da dieser selbst nicht kalibriert wird. Jedoch ist die gezeigte Abschätzung der Position gemessen am Ergebnis ausreichend.

Bisher unberücksichtigt ist die Aussage über die Genauigkeit der erfassten Punkte. Diese ist im Modell nicht abgebildet. Vielmehr wird im Modell die Berechnung der Messpunkte auf Basis der Triangulation nicht genutzt, sondern ein Berechnungsverfahren auf Basis finiter Flächenelemente und einzelner Beobachter verwendet. Somit ist keine spezielle Kenntnis des Systems und dessen Algorithmen, Filter etc. zur Punkterzeugung notwendig (vgl. Abschnitt *Stand der Technik*, Seite 3) und das Verfahren für eine breite Auswahl an (kommerziellen) Streifenprojektionssensoren gültig.

¹Zugrunde liegt ein PC mit Xeon E5520 CPU und einer Quadro FX 4800 GPU.

Im Fazit kann gesagt werden, dass das Modell im Vergleich zu anderen Arbeiten, ohne vollständige Kenntnis des Scansystems (Algorithmen, Filter, etc.) nutzbar ist. Am Beispiel wurde die entsprechende Anpassung der benötigten Parameter aufgezeigt und die Methode an Bauteilen nachgewiesen. Die Bauteile selbst können entsprechend detailliert beschrieben werden, um so bei komplexen Geometrien ausreichende Aussagen über die erfassten Flächenbereiche zu erhalten. Es zeigt sich auch das hohe nutzbare Optimierungspotenzial des Verfahrens und somit die praktische und wirtschaftliche Relevanz. Der größte Nachteil besteht in der schwierigen Anpassung der Beleuchtungsparameter an Objekte, deren Oberfläche inhomogen und optisch unkooperativ ist.

6.2 Ausblick

Das aufgezeigte Verfahren zur Optimierung der Erfassungsplanung am Beispiel der Streifenprojektion weist bei Objekten mit weiß mattierten Oberflächen sehr gute, praktisch anwendbare Optimierungsergebnisse auf. Bei glänzender, anisotroper Materialoberfläche muss das Beleuchtungs- und Lichtreflexionsmodell jedoch erweitert werden. Hier besteht die Aufgabe in der Prüfung, ob eine genauere Beschreibung sinnvoll und nachhaltig genauere Aussagen liefert. Eine höherwertige Beschreibung erfordert immer einen höheren Aufwand um entsprechende Parameter für verschiedene Scansysteme sowie für die Vielzahl an Materialien zu bestimmen. Somit verkompliziert sich das Verfahren und muss durch das Ergebnis bzw. Nutzen den Aufwand rechtfertigen. Verwendet werden könnten bspw. physikalische Beleuchtungsmodelle, welche unterschiedliche texturierte Objekte berechnen können.

Die Integration eines Qualitätskriteriums für erfasste Messpunkte erfordert, neben der beschriebenen hohen Kenntnis des Streifenprojektionssystems und dessen Messunsicherheiten, einen hohen Umsetzungsaufwand, da die Berechnung von erfassten Punkten und die daraus resultierende Abschätzung der Qualität bisher unberücksichtigt blieb. Im Ergebnis lassen sich aber neben der Optimierung der erfassten Bereiche auch die Punktqualität optimieren.

Die Abbildungstransformation und die dafür notwendigen Daten der Kameras und des Projektors können bei einer Integration in das Erfassungssystem genau bestimmt werden. Auch bei einer genauen Sensorführung und Positionierung während der Abarbeitung eines Erfassungsplanes steigt die Genauigkeit der Abbildung.

Denkbar ist ferner, das Verfahren in anderen Problemstellung zu adaptieren. Beispielsweise ist eine Anwendung im Bereich des hierarchischen Scannens für unbekannte Objekte denkbar. Hier erfolgt die Erfassung eines Objektes iterativ mit verschiedenen Scansystemen. Dabei wird mit Systemen mit großen Messvolumen aber geringer Abbildungsqualität begonnen, um eine erste Aussage der Objektgeometrie zu erhalten. Anhand dieser könnte die Berechnung des nächsten Erfassungsplanes für ein höher auflösendes Messsystem folgen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über 3D Digitalisierverfahren	3
1.2	Beispieldatensätze für verschiedene CT-Anwendungsgebiete	4
1.3	Beispiele optischer Digitalisiergeräte	5
2.1	Triangulationsverfahren	9
2.2	Prinzip der passiven Triangulation	10
2.3	Prinzip der aktiven Triangulation	11
2.4	Lichtschnittverfahren	11
2.5	Triangulationsprinzip am Dreieck	12
2.6	Epipolargeometrie	13
2.7	Codierungsverfahren mit strukturierter Beleuchtung	15
2.8	Prinzip des räumlichen Vorwärtsschrittes	15
2.9	Fehlerellipsoide beim Vorwärtsschritt	16
2.10	Optische Abbildung für dünne, ideale Linsen	17
2.11	Innere Orientierung einer Kamera	20
2.12	Schärfentiefe	22
2.13	Tiefenschärfe bei verschiedenen Blenden	23
2.14	Linienmusterübertragung	24
2.15	Siemensstern	24
2.16	Bildmaßstab	25
2.17	Bildmaßstab bei wechselnden Aufnahmeentfernungen	26
2.18	Chromatische Aberration	27
2.19	Verzeichnung	28
2.20	Transformationskette zur Abbildung eines Objektpunktes	29
2.21	Koordinatensysteme der Abbildungstransformationskette	29
2.22	Sichtvolumen einer zentralperspektivischen Projektion	31
2.23	Renderpipeline moderner Grafikkarten	33
2.24	Prinzip Streifenprojektion	33
2.25	Binär- und Graycode	34
2.26	Phase-Shift-Verfahren	36
2.27	Kalibrierplatten	36
2.28	Messfeld des Scanners ATOS II	38
2.29	Messfeldkonfiguration	38

2.30	Mehrbildtriangulation	40
2.31	Helligkeitsübertragung	42
2.32	Reflexion	43
2.33	Glanzstellen	44
2.34	Lichtmengenbilanz	46
2.35	Verdeckung am Beispiel eines einfachen Objektes	47
2.36	Photoelektrischer Effekt	48
2.37	Fehlereinflüsse	49
3.1	Aufnahmekoordinatensystem gemäß Aufnahmesituation	54
3.2	Transformationsketten	56
3.3	Messfeldkonfiguration mit unterschiedlichen Triangulationswinkeln	59
3.4	Diskretisierung einer Kurve	60
3.5	Meshes	61
3.6	Sichtbarkeitsberechnung	62
3.7	Verdeckungsproblematik	63
3.8	farblich codierte Dreiecke	64
3.9	Reflexionsverhalten isotroper (linke Kugel) und anisotroper Materialdefinition (rechte Kugel) [Mar14]	66
3.10	Geometrie der Beleuchtungssituation für die Bildfragmentberechnung	67
3.11	Intensitätswerte verschiedener fotometrischer Konfigurationen	69
3.12	Superposition diffuser und glänzender Reflexionsanteile	70
3.13	Ansicht eine Beobachters	73
4.1	Technische Angaben zum ATOS II	76
4.2	Zu erfassende Oberfläche gemäß Verwendung	77
4.3	Numerische Optimierung (Ablaufschema)	80
4.4	Hierarchische Optimierung (Ablaufschema)	81
4.5	Prinzip Evolutionärer Algorithmen (Ablaufschema)	82
4.6	Kollisionsberechnung mit Hüllkugeln	83
4.7	Passmarkenüberdeckung mehrerer Aufnahmen	84
4.8	Gültiger Bereich zur Scannerpositionierung	85
5.1	Aufbau des Scanners <i>kolibri Flex 100</i>	87
5.2	Zulässige Bewegungsbereiche	88
5.3	Koordinatensystemfestlegung	89
5.4	Aufbau zur Parameterbestimmung	91
5.5	Rücktransformation zweier Einzelaufnahmen in Scannerbezugssystem	93
5.6	Nachmodellierter Testaufbau zur Bildöffnungswinkelbestimmung	94
5.7	Testszene zur Bestimmung des Bildöffnungswinkels	95
5.8	Bestimmung der kreisförmigen Kugelsilhouette	96

5.9	Testszene mit kalibriertem Bildöffnungswinkel	97
5.10	Reale Beleuchtungssituation während der Aufnahmen am Testaufbau	98
5.11	Antastlinie zur Bestimmung des entfernungsabhängigen Lichtintensitätsabfalles	99
5.12	Fotometrische Kalibrierung - Ausgangssituation	100
5.13	Fotometrische Kalibrierung - Fotometrisch Kalibriert	101
5.14	Testszene mit Verdichterschaukel	103
5.15	Initialisierungsszene mit verschiedenen Datenrepräsentationen	104
5.16	Verschiedene Netzauflösungen der Verdichterschaukel	104
5.17	Fotometrische Kalibrierung der Verdichterschaukel	105
5.18	Einzelansichten einzelner Beobachter	106
5.19	Gegenüberstellung der Scannergebnisse	107
5.20	Scannergebnisse im Vergleich	107
5.21	Codierung der Winkelpositionen im Chromosom	111
5.22	Rekombination zweier Chromosomensätze	111
5.23	Mutation eines Chromosoms	111
5.24	Fitnessverlauf während der Optimierung	113
5.25	Beste Individuen verschiedener Optimierungsdurchläufe	114
5.26	Iterative Optimierung der Positionsanzahl	114
5.27	Gegenüberstellung von Standard- zu optimiertem Erfassungsplan	115
5.28	Halbritzelszene	116
5.29	Optimierung des Halbritzels	117
6.1	Lichtparametrisierung an glänzenden Bauteilen	120
6.2	Einfluss der Netzauflösung auf das berechnete Ergebnis (grün hervorgehoben)	120
A.1	Lichtbeugung an einer Spaltblende	139
A.2	Brechung und Reflexion	140
A.3	Einfluss des Glanzfaktors auf die Reflexion	141
A.4	Einfluss des Glanzfaktors n	141
A.5	Selektionsmethoden	150
A.6	Population - Startgeneration	153
A.7	Population - Generation 25	153
A.8	Population - Generation 50	154
A.9	Iterative Optimierung der Positionsanzahl	154

Tabellenverzeichnis

1.1	Verdeckungssituationen an einem Kamera-Projektor-System	8
2.1	Messfeldparameter	39
2.2	Zusammenstellung	50
2.2	Zusammenstellung	51
3.1	Abbildungsparameter	58
3.2	Fotometrische Modellparameter	71
3.3	Schnittmengen zur Sichtbarkeitsberechnung	73
5.1	Bestimmung der geometrischen Modellparameter	102
5.2	Erfassungsmöglichkeiten	108
5.3	Randbedingungen	109
5.4	Vergleich der Scanergebnisse	115
A.1	Kamera 1 - Oben	143
A.2	Kamera 2 - Oben	143
A.3	Kamera 1 - Unten	144
A.4	Kamera 2 - Unten	144
A.5	Zusammenfassung	145
A.6	Scanergebnisse der Beispielerfassung	146
A.6	Scanergebnisse der Beispielerfassung	147
A.6	Scanergebnisse der Beispielerfassung	148
A.6	Scanergebnisse der Beispielerfassung	149
A.7	Modellparameter der Verdichterschaukel	152

Literaturverzeichnis

- [26185] 2619, VDI/VDE/DGQ: *Prüfplanung*. 1985
- [AAT79] ALTSCHULER, M. D. ; ALTSCHULER, B. R. ; TABOADA, J.: Measuring surfaces space-coded by a laser-projected dot matrix. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* Bd. 182, 1979 (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series), S. 187
- [AM97] ALBRECHT, P. ; MICHAELIS, B.: 3D-Koordinaten durch Korrelation von Grauwertfolgen. In: *4. ABW-Workshop, Technische Akademie Esslingen*, 1997
- [Asw12] ASWENDT, Petra: Mikrospiegel basierte 3D Scannersysteme für Reverse Engineering Lösungen in einem weiten Skalenbereich. In: *EEE2012 Konstruktionstechnik*, 2012
- [Bak11] BAKER, R. J.: *CMOS - Circuit Design, Layout, and Simulation*. John Wiley and Sons, 2011. – ISBN 978-1-118-03823-9
- [Bal08] BALIGA, B. J.: *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. – ISBN 978-0-387-47313-0
- [Büc08] BÜCHNER, Klaus: Partikel-Simulation für Pulverbeschichtungen, Lacke und Glasuren. In: *3D Nord-Ost*. Berlin, 2008
- [Bel06] BELTLE, Jens: *3D-Oberflächenvisualisierung des Gehör- und Gleichgewichtsorganes mittels Image Fusion von HR-CT und HR-MRT-Volumendatensätzen*, Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Diss., 2006
- [Bey02] BEYER, Christiane: *Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2002
- [BGBL04] BLANCH, Renaud ; GUIARD, Yves ; BEAUDOUIN-LAFON, Michel: Semantic pointing: improving target acquisition with control-display ratio adaptation. In: *CHI '04: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA : ACM, 2004. – ISBN 1-58113-702-8, S. 519–526
- [BJ08] BUCKLEY, James J. ; JOWERS, Leonard J.: *Monte Carlo methods in fuzzy optimization*. Springer, 2008. – ISBN 3540762892

- [Bli77] BLINN, James F.: Models of light reflection for computer synthesized pictures. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 11 (1977), Juli, Nr. 2, S. 192–198. – ISSN 0097–8930
- [BM92] BESL, P.J. ; MCKAY, N.D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (1992), S. 239–256. – ISSN 0162–8828
- [Box65] BOX, M. J.: A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods. In: *The Computer Journal* 8 (1965), Nr. 1, S. 42–52
- [Bre93] BREUCKMANN, B: *Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis: Grundlagen der 3D-Messtechnik, Farbbildanalyse, Holografie und Interferometrie mit zahlreichen praktischen Applikationen.* Franzis Verlag München, 1993
- [Bre00] BREMER, Claus: Adaptive strategies for manufacturing and repair of blades and blisks. In: *2000-GT-0340 - ASME Turbo Expo 2000*, 2000
- [Bro71] BROWN, Duane C.: Close-range camera calibration. In: *Photogrammetric Engineering* 37 (1971), Nr. 8, S. 855–866
- [BS09] BEHRING ; SCHUER: The XXL scale in industrial photogrammetry. In: *Optical Metrology 2009 GOM Conference*, 2009
- [Böt08] BÖTTNER, Thomas: *Untersuchungen zur Messunsicherheit mit Hilfe eines virtuellen Streifenprojektionssystems*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2008
- [Böt09] BÖTTNER, Thomas: *Messunsicherheitsbetrachtungen an einem virtuellen Streifenprojektionssystem*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2009
- [CN12] CHRISTOPH, Ralf ; NEUMANN, Hans J.: *Röntgentomographie in der industriellen Messtechnik.* Verlag moderne Industrie, 2012
- [CN06] CHRISTOPH, Ralf ; NEUMANN, Hans J.: *Multisensor- Koordinatenmesstechnik.* Verlag moderne Industrie, 2006
- [CT81] COOK, Robert L. ; TORRANCE, Kenneth E.: A Reflectance Model for Computer Graphics. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 15 (1981), August, Nr. 3, S. 307–316. – ISSN 0097–8930
- [DD06] DUDLEY, Dana ; DUNN, Cheraina: DLP technology - not just for projectors and TVs. In: *Photonic international* (2006), S. 98–101
- [DGNK99] DANA, Kristin J. ; GINNEKEN, Bram van ; NAYAR, Shree K. ; KOENDERINK, Jan J.: Reflectance and texture of real-world surfaces. In: *ACM TRANS. GRAPHICS* (1999), S. 730–301

- [DHSS14] DAHLKE, Stefan ; HOLTZHAUSEN, Stefan ; SCHÖNE, Christine ; STELZER, Ralph: Kombinierte Visualisierung von CT- und polygonalen Oberflächendaten für medizinische Applikationen. In: *Rapid Tech Erfurt*, 2014
- [DIN03] Norm DIN 1335 Dezember 2003. *Geometrische Optik*
- [DK05] DUTSCHKE, Wolfgang ; KEFERSTEIN, Claus P.: *Fertigungsmesstechnik*. 5. Auflage. Teubner Verlag, 2005
- [DMG12] DÖRBAND, Bernd ; MÜLLER, Henriette ; GROSS, Herbert: *Handbook of Optical Systems, Metrology of Optical Components and Systems*. 1. Auflage. John Wiley and Sons, 2012. – ISBN 978-3-527-40381-3
- [DPG08] DUO, Pierangelo ; PIANKA, Christian ; GOLOWIN, Andrej ; FUELLER, Matthias ; SCHAEFER, Roger ; BERNHARDT, Ulf: Simulated foreign object damage on blade aerofoils. Real damage investigation. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, 2008
- [EF08] ELMQVIST, Niklas ; FEKETE, Jean-Daniel: Semantic pointing for object picking in complex 3D environments. In: *GI '08: Proceedings of graphics interface 2008*. Toronto, Ont., Canada, Canada : Canadian Information Processing Society, 2008. – ISBN 978-1-56881-423-0, S. 243-250
- [Ein05] EINSTEIN, Albert: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. J. Barth, 1905
- [FDFH90] FOLEY, James D. ; DAM, Andries van ; FEINER, Steven K. ; HUGHES, John F.: *Computer graphics: principles and practice (2nd ed.)*. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990. – ISBN 0-201-12110-7
- [Fig07] FIGGE, Asmus: *Erstellung von Violumenmodellen menschlicher Unterkiefer und Ableitung von angepassten Kiefergelenkendoprothesen*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2007
- [FOW66] FOGEL, L.J. ; OWENS, A.J. ; WALSH, M.J.: *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. John Wiley & Sons, 1966
- [Güh02] GÜHRING, Jens: *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*, Universität Stuttgart, Diss., 2002
- [Gom12a] GOM: *ATOS - Industrielle 3D Scanner*. <http://www.gom.com/de/messsysteme/3d-scanner.html>. Version: Februar 2012
- [gom12b] GOM - GESELLSCHAFT FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK (Hrsg.): *Anwendungsbeispiel: Automatisierte Robotermesszelle zur Inspektion von Blechteilen*. gom - Gesellschaft für Optische Messtechnik, Februar 2012

- [GTGB84] GORAL, Cindy M. ; TORRANCE, Kenneth E. ; GREENBERG, Donald P. ; BATAILE, Bennett: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 18 (1984), Januar, Nr. 3, S. 213–222. – ISSN 0097–8930
- [Hec05] HECHT, Eugene: *Optik*. überarbeitete Auflage. München : Oldenbourg Verlag, 2005. – ISBN 978–3–486–27359–5
- [Hei09] HEINZE, Kay: Probabilistic HCF-Investigation of compressor blades. In: *ASME Turbo Expo 2009*. Orlando, USA, 2009
- [HFHS09] HÜBNER, Stefanie ; FUCHS, Theobald ; HASSLER, Ulf ; STACKELBERG, Burkhard von: Multimodale Bildverarbeitung in der zerstörungsfreien Prüfung und der Materialcharakterisierung von Faserverbundwerkstoffen. In: *DGZfP Jahrestagung* (2009)
- [HKGR11] HASKAMP, Klaus ; KÄSTNER, Markus ; GILLHAUS, Rüdiger ; REITHMEIER, Eduard: Messunsicherheitsanalyse mittels virtueller Streifenprojektionstechnik auf Grundlage von Polygonmodellen. In: *TM Technisches Messen* 78 (2011)
- [HM79] HOWES, M.J. ; MORGAN, David V.: *Charge-coupled devices and systems*. First Edition. New York : Wiley, 1979. – ISBN 978–0–471–99665–1
- [Hol73] HOLLAND, J: Genetic Algorithms and the optimal allocation of trials. In: *SIAM Journal of Computing* (1973), S. 88–105
- [Hol75] HOLLAND, John H.: *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975
- [HSS09] HOLTZHAUSEN, S. ; SCHREIBER, S. ; SCHONE, C. ; STELZER, R. ; HEINZE, K. ; LANGE, A.: GT2009-59902 Highly Accurate Automated 3D Measuring and Data Conditioning for Turbine and Compressor Blades. In: *PROCEEDINGS OF THE ASME TURBO EXPO* Bd. 6a. New York, N.Y. : ASME, 2009 (PROCEEDINGS OF THE ASME TURBO EXPO), S. 37–42
- [HTSG91] HE, Xiao D. ; TORRANCE, Kenneth E. ; SILLION, François X. ; GREENBERG, Donald P.: A Comprehensive Physical Model for Light Reflection. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 25 (1991), Juli, Nr. 4, S. 175–186. – ISSN 0097–8930
- [HV08] HEINZE, Kay ; VOGELER, Konrad: LUFO III - Vorhersage von Life Cycle Verhalten eines Hochdruckverdichters / TU Dresden. 2007-2008. – Forschungsprojekt
- [HXC06] HU, Yingsong ; XI, Jiangtao ; CHICHARO, Joe ; LI, Enbang ; YANG, Zongkai: Discrete cosine transform-based shift estimation for fringe pattern profilometry

- using a generalized analysis model. In: *Appl. Opt.* 45 (2006), Sep, Nr. 25, S. 6560–6567
- [HZ04] HARTLEY, R.I. ; ZISSERMAN, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, 2004
- [Ins05] INSTRUMENTS, Texas: Single-Panel DLPTM Projection System Optics / Discovery DLPA002. 2005. – Forschungsbericht
- [IVB06] IVB JENA GMBH (Hrsg.): *Technical specification - optical 3D digitizer kolibrie Flex 100*. IVB Jena GmbH, 2006
- [JFJ00] JACQUOT, P. ; FOURNIER, J. M. ; JACQUOT, P.: *Interferometry in Speckle Light - Theory and Applications*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2000. – ISBN 978-3-540-67943-1
- [JM97] JOHNS, David ; MARTIN, Ken: *Analog integrated circuit design*. 1. Auflage. John Wiley and Sons, 1997. – ISBN 978-0-471-14448-9
- [Kaj86] KAJIYA, James T.: The Rendering Equation. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA : ACM, 1986 (SIGGRAPH '86). – ISBN 0-89791-196-2, 143–150
- [Kau11] KAUFMANN, Guillermo H.: *Advances in Speckle Metrology and Related Techniques*. John Wiley and Sons, 2011. – ISBN 978-3-527-63387-6
- [Ken10] KENNEDY, James: Particle Swarm Optimization. In: SAMMUT, Claude (Hrsg.) ; WEBB, Geoffrey I. (Hrsg.): *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer US, 2010. – ISBN 978-0-387-30768-8, S. 760–766
- [Kir84] KIRKPATRICK, Scott: Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. In: *Journal of Statistical Physics* 34 (1984), Nr. 5-6, S. 975–986. – ISSN 0022-4715
- [KKNG03] KOPP, S. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G. ; GELLER, R.: G-scan - mobile multiview 3-D measuring system for the analysis of the face. In: *International journal of computerized dentistry Nr.6* 4 (2003), S. S.321–331
- [KMHG13] KIM, Young M. ; MITRA, Niloy J. ; HUANG, Qixing ; GUIBAS, Leonidas: Guided Real-Time Scanning of Indoor Objects. In: *Pacific Graphics 2013* (2013)
- [Kru09] KRUCK, Erwin ; IVB JENA GMBH (Hrsg.): *Bingo - Bündelausgleich für Ingenieurobjekte*. Version 5.6. Aalen: IVB Jena GmbH, 2009
- [LC87] LORENSEN, William E. ; CLINE, Harvey E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 21 (1987), August, S. 163–169. – ISSN 0097-8930

- [LES08] LEE, Kwang Y. ; EL-SHARKAWI, Mohamed A.: *Modern Heuristic Optimization Techniques : Theory and Applications to Power Systems*. Wiley, 2008. – ISBN 9780470225851
- [LFD13] LI, Wenguo ; FANG, Suping ; DUAN, Shaojun: Accurate and efficient algorithm for simulation of fringe projection system. In: *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 124 (2013), Nr. 18, S. 3542 – 3548. – ISSN 0030–4026
- [LSG13] LOBACHEV, O. ; SCHMIDT, M. ; ; GUTHE, M.: Optimizing Multiple Camera Positions for the Deflectometric Measurement of Multiple Varying Targets. In: *Journal of WSCG* 21 (2013), S. 145–152. – ISSN 1213–6972
- [LTD04] LIAO, Sheng hui ; TONG, Ruo feng ; DONG, Jin xiang: 3D Human Mandible Reconstruction from CT Data. In: *8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design Proceedings*, 2004
- [Luh10a] LUHMANN, Thomas: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*, Technische Universität Dresden, Diss., 2010
- [Luh10b] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 3. Auflage. Rostock : Wichmann Herbert, 2010. – ISBN 978–3–879–07479–2
- [Mar14] MARK, Bill: *Examples of Ray Tracing*. <http://pl887.pairlitesite.com/teach/cs384g-04-fall/projects/ray/ray-examples/>. Version: Mai 2014
- [Men09] MENDEL: Strategic use of optical metrology for tooling and sheet metal applications at Ford Europe. In: *Optical Metrology 2009 GOM Conference*, 2009
- [Mer02] MERKLE, D.: *Ameisenalgorithmen: Optimierung und Modellierung*. 2002
- [MF98] MASSIOS, N. A. ; FISHER, R. B.: A Best Next View Selection Algorithm Incorporating a Quality Criterion. In: *Proc. BMVC*, 1998. – ISBN 1–901725–04–9, S. 78.1–78.10
- [MGNR12] MÜLLER-GRONBACH, Thomas ; NOVAK, Erich ; RITTER, Klaus: *Monte Carlo-Algorithmen*. Springer, 2012. – ISBN 9783540891406
- [Nic65] NICODEMUS, Fred E.: Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. In: *Appl. Opt.* 4 (1965), Jul, Nr. 7, S. 767–775
- [Nic70] NICODEMUS, F. E.: Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. In: *Appl. Opt.* 9 (1970), Jun, Nr. 6, S. 1474–1475
- [Pap96] PAPAGEORGIOU, Markos: *Optimierung / statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 2. erw. u. verb. Aufl. Oldenbourg, 1996. – ISBN 3486237756

- [Pen07] PENG, Tao: *Algorithms and models for 3-D shape measurement using digital fringe projections*, University of Maryland, Diss., 2007
- [PH04] PHARR, Matt ; HUMPHREYS, Greg: *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2004. – ISBN 012553180X
- [Pho75] PHONG, Bui T.: Illumination for Computer Generated Pictures. In: *Commun. ACM* 18 (1975), Juni, Nr. 6, S. 311–317. – ISSN 0001–0782
- [PP12] PROKHOROV, Alexander ; PROKHOROVA, Nina I.: Application of the three-component bidirectional reflectance distribution function model to Monte Carlo calculation of spectral effective emissivities of nonisothermal blackbody cavities. In: *Appl. Opt.* 51 (2012), Nov, Nr. 33, S. 8003–8012
- [Pro12] PROKHOROV, Alexander: Effective emissivities of isothermal blackbody cavities calculated by the Monte Carlo method using the three-component bidirectional reflectance distribution function model. In: *Appl. Opt.* 51 (2012), May, Nr. 13, S. 2322–2332
- [PS05] PAGÈS, Jordi ; SALVI, Joaquim: *Coded light projection techniques for 3D reconstruction*. 2005
- [PSa03] PAGÈS, Jordi ; SALVI, Joaquim ; AL. et: Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling. In: *IN PROC. IEEE INTERNATIONAL CONF. ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA)*, 2003, S. 133–138
- [Rec80] RECHENBERG, I.: Problemlösungen mit Evolutionsstrategien. In: SCHWARZE, J. (Hrsg.) ; DOBSCHÜTZ, L. von (Hrsg.) ; FLEISCHMANN, B. (Hrsg.) ; SCHNEEWEISS, Ch. (Hrsg.) ; STECKHAN, H. (Hrsg.): *Vorträge der Jahrestagung 1979 / Papers of the Annual Meeting 1979* Bd. 1979. Physica-Verlag HD, 1980. – ISBN 978–3–7908–0223–8, S. 499–502
- [Rei99] REICH, Carsten: *Vollständige optische Formerfassung durch photogrammetrische Verknüpfung von Teilflächen*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 1999
- [RLKG09] ROST, Randi J. ; LICEA-KANE, Bill M. ; GINSBURG, Dan ; KESSENICH, John M. ; LICHTENBELT, Barthold ; MALAN, Hugh ; WEIBLEN, Mike: *OpenGL Shading Language*. 3. Aufl. Amsterdam : Pearson Education, 2009. – ISBN 978–0–321–66922–3
- [Sal98] SALVI, Joaquim: *An Approach to Coded Structured Light to Obtain Three Dimensional Information*, University of Girona, Diss., 1998

- [Sch11] SCHREIBER, Steffen: *Leitkurvenbasiertes 3D-Digitalisieren auf Werkzeugmaschinen*, TU Dresden, Diss., 2011
- [Sei11] SEIBT, Tobias: *Umsetzung eines geeigneten Marching Cubes Algorithmus zur Generierung facettierter Oberflächen*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2011
- [SHF94] SCHÖNEBURG, E. ; HEINZMANN, F. ; FEDDERSEN, S: *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien*. Addison-Wesley Publishing Company, 1994
- [SHM00] SCHWARTE, Rudolf ; HÄUSLER, Gerd ; MALZ, Reinhard W.: *Principles of Three-dimensional Imaging Techniques*. Academic Press, 2000. – 183 S.
- [SHS13] SEMBDNER, P. ; HOLTZHAUSEN, S. ; SCHONE, C. ; STELZER, R. ; KOVACS, G. ; KOCHAN, D.: Additional Methods to Analyze Computer Tomography Data for Medical Purposes and Generatively Produced Technical Components. In: *INTERNATIONAL FEDERATION FOR INFORMATION PROCESSING - PUBLICATIONS - IFIP*. Heidelberg : Springer, 2013 (INTERNATIONAL FEDERATION FOR INFORMATION PROCESSING - PUBLICATIONS - IFIP 411), S. 221–229
- [SP97] STORN, Rainer ; PRICE, Kenneth: Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. In: *Journal of Global Optimization* 11 (1997), Nr. 4, S. 341–359. – ISSN 0925–5001
- [SPB04] SALVI, Joaquim ; PAGÈS, Jordi ; BATLLE, Joan: Pattern Codification Strategies in Structured Light Systems. In: *PATTERN RECOGNITION* 37 (2004), S. 827–849
- [SRT11] SCHOLZ-REITER, Bernd ; THAMER, Hendrik: Multi-View Sensor Fusion of Synthetic ToF Images for Object Recognition of Universal Logistic Goods. In: *3D Nord-Ost*. Berlin, 2011
- [ST02] SCHRÖDER, Gottfried ; TREIBER, Hanskarl: *Technische Optik*. 9. erweiterte Auflage. Würzburg : Vogel, 2002. – ISBN 978–3–802–31923–5
- [SW90] STAHS, T. ; WAHL, F. M.: Oberflächenmessung mit einem 3D-Robotersensor. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* Heft 6 (1990), S. 190–202
- [Tec12] TECHNOLOGIES, PMD: *PMD Vision CamCube 3.0*. <http://www.pmdtec.com/products-services/pmdvisionr-cameras/pmdvisionr-camcube-30/>. Version: Februar 2012
- [Tsa92] TSAI, Roger Y.: Radiometry. USA : Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1992. – ISBN 0–86720–294–7, Kapitel A versatile camera calibration technique for high-

accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, S. 221–244

- [Via11] VIALUX, GmbH: *zSnapper Datenblatt*, 2011
- [Wah86] WAHL, Friedrich M.: A Coded Light Approach for Depth Map Acquisition. In: *Mustererkennung 1986, 8. DAGM-Symposium*. London, UK, UK : Springer-Verlag, 1986. – ISBN 3–540–16812–5, 12–17
- [Wei07] WEICKER, Karsten: *Evolutionäre Algorithmen*. 2., überarb. und erw. Aufl. Teubner, 2007. – ISBN 9783835102194
- [Wei10] WEICKMANN, Johannes: *Assistenzsystem für die Prüfung von Blechbauteilen mit Mehrkomponenten-Streifenprojektionssystemen unter Anwendung der "virtuellen Rücktransformation"*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2010
- [WGS07] WIEDEMANN, Gerd ; GOEBBELS, Jürgen ; STADIE, Ronny ; HILLEMEIER, Bernd ; HAIBEL, Astrid: Untersuchung von faserverstärktem Porenbeton mit Computertomographie. In: *DGZfP Jahrestagung (2007)*
- [WHW08] WECKENMANN, Albert ; HARTMANN, Wito ; WEICKMANN, Johannes: Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. In: *Proc. SPIE 7102 (2008)*, S. 71020N–71020N–12
- [Wio01] WIORA, Georg: *Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren*, Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg, Diss., 2001
- [YD] YOUNG, Mark ; DAVIS, James: *Viewpoint-Coded Structured Light*
- [Yxl12] YXLON: *CT-Prüfsystem zur Qualitätskontrolle von Turbinenschaufeln*. <http://www.xpertgate.de/applikation/CT-Pruefung/index.html>. Version: Februar 2012
- [Zac03] ZACHER, Michael: *Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen*, RWTH Aachen, Diss., 2003
- [ZCS02] ZHANG, Li ; CURLESS, Brian ; SEITZ, Steven M.: Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In: *In The 1st IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2002, S. 24–36
- [Zep04] ZEPPENFELD, Klaus: *Lehrbuch der Grafikprogrammierung - Grundlagen, Programmierung, Anwendung*. 2004. 1. Aufl. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2004. – ISBN 978–3–827–41028–3

- [Züg] ZÜGGE, Hannfried: *Achromat, Apochromat, Superchromat - Worin unterscheiden sie sich?*. – Mathematisch- Optische Entwicklung, Carl Zeiss
- [Zha00] ZHANG, Zhengyou: A Flexible New Technique for Camera Calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000), S. 1330–1334. – ISSN 0162–8828

A Anhang

A.1 Physikalische Grundlagen: Beugung, Brechung und Reflexion

Die Ausbreitung geradliniger ebener oder kugelförmiger Lichtwellen wird beim Durchgang durch einen Spalt oder einem Loch gestört. Es kommt zum kugelförmigen Ausbreiten der Elementarwellen an den Loch- bzw. Spaltkanten, der sog. *Beugung*. Die Folge sind Schwankungen der Lichtintensität I am Bildsensor durch Welleninterferenzen. In Abbildung A.1 ist eine ebene Wellenfront sowie ein lichtundurchlässiges Medium mit einem Spalt dargestellt. An den Spaltkanten wird die Welle gebeugt und breitet sich von da aus kreisförmig aus. Ebenfalls dargestellt sind die in einem Sensor auftretenden Intensitätsschwankung aufgrund der Interferenzen. Bei kreisrunden Spaltöffnungen bildet das Intensitätsmuster ein sog. Airy-Muster. Der intensive Lichtfleck in der Mitte des Musters ist die Airy-Scheibe.

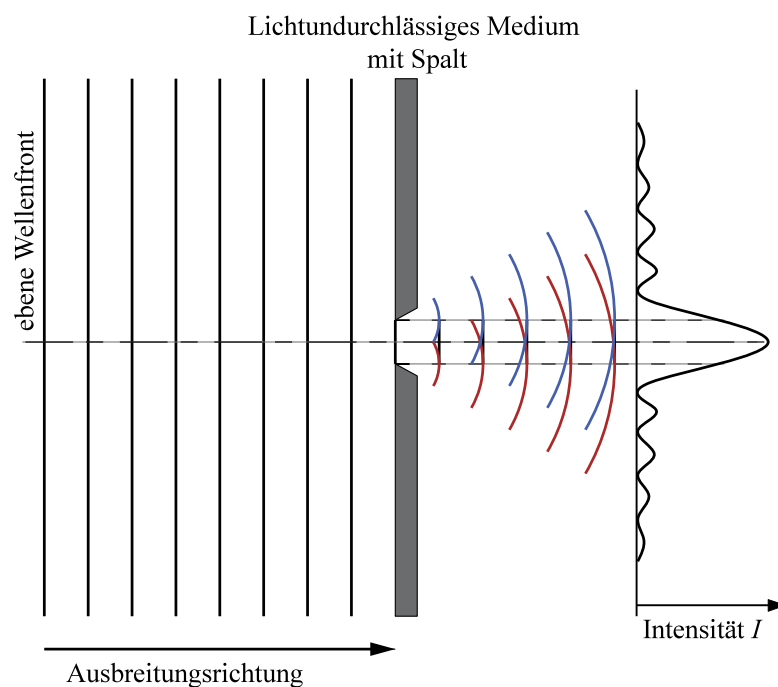


Abb. A.1: Beugung des Lichtes an einem Spalt mit Funktion der Intensität I des im Sensor auftretenden Lichtes über der Ortskoordinate y (vertikale Richtung) nach [ST02]

Licht breitet sich in unterschiedlichen Medien unterschiedlich schnell aus. Beim Übergang von Medium zu Medium kommt es zur *Brechung* und *Reflexion*. Aus dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten c_1 und c_2 lässt sich der Brechungsindex n errechnen (A.1). Dieser

wird als materialabhängige Größe in Bezug zur Lichtgeschwindigkeit in Luft c_{Luft} angegeben (A.2).

$$n = \frac{c_1}{c_2} \quad (n \text{ ist der Brechungsindex}) \quad (\text{A.1})$$

$$n = \frac{c_{Luft}}{c} \quad (\text{A.2})$$

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) \quad (\text{A.3})$$

Tritt Licht von einem Medium in ein anderes Medium, wird es abgelenkt. Die Ablenkung ist vom jeweiligen Brechungsindex abhängig und kann mit der in (A.3) beschriebenen Formel, dem Brechungsgesetz bestimmt werden (siehe auch Abbildung A.2a). Bei der Reflexion wird das Licht an der Grenzfläche zwischen zwei Medien, je nach Reflexionsgrad des Materials, teilweise oder vollständig zurückgeworfen (A.4). Bei glatten Oberflächen beschreiben der Normalenvektor der Reflexionsfläche und der Einfallsvektor des Lichtes die Einfallsebene. Der reflektierte Lichtstrahl liegt in eben dieser Ebene, wobei der Ausfallswinkel α_r gleich dem Einfallswinkel α_1 ist (Abbildung A.2b). Bei rauen Oberflächen wird das Licht diffus reflektiert.

$$\alpha_r = \alpha_1 \quad (\text{A.4})$$

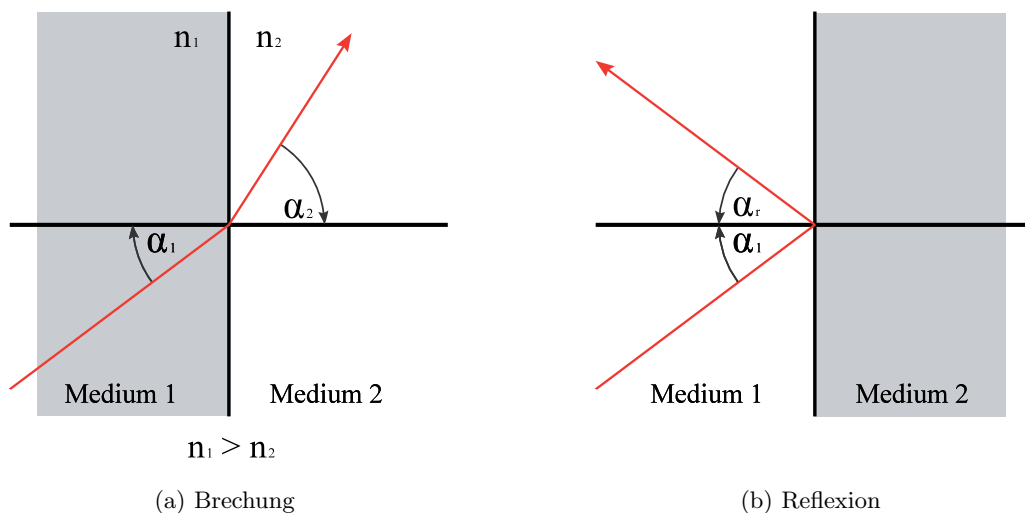


Abb. A.2: Brechung und Reflexion anhand zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex

A.2 Einfluss fotometrischer Größen

Hier ist der Einfluss des Glanzfaktors aus dem beschriebenen Modell dargestellt. Große Werte für n ergeben einen intensiven Glanzfleck, der das restliche Objekt, je nach Glanzintensität, deutlich überstrahlen kann.

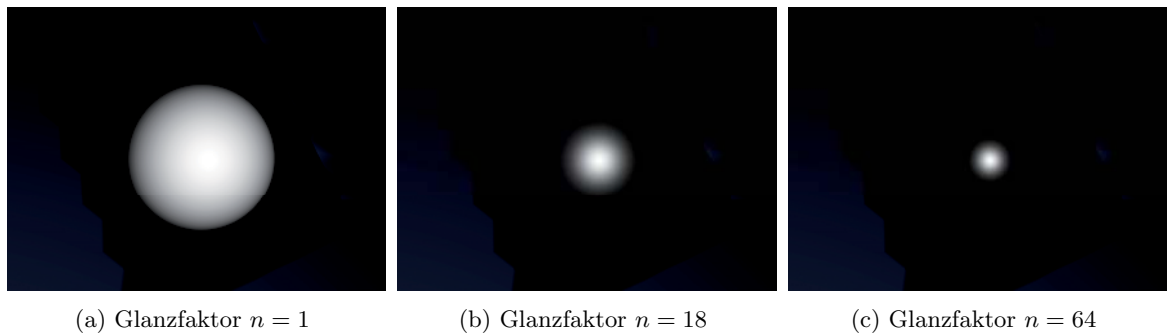


Abb. A.3: Einfluss verschiedener Glanzfaktoren auf die Reflexion.

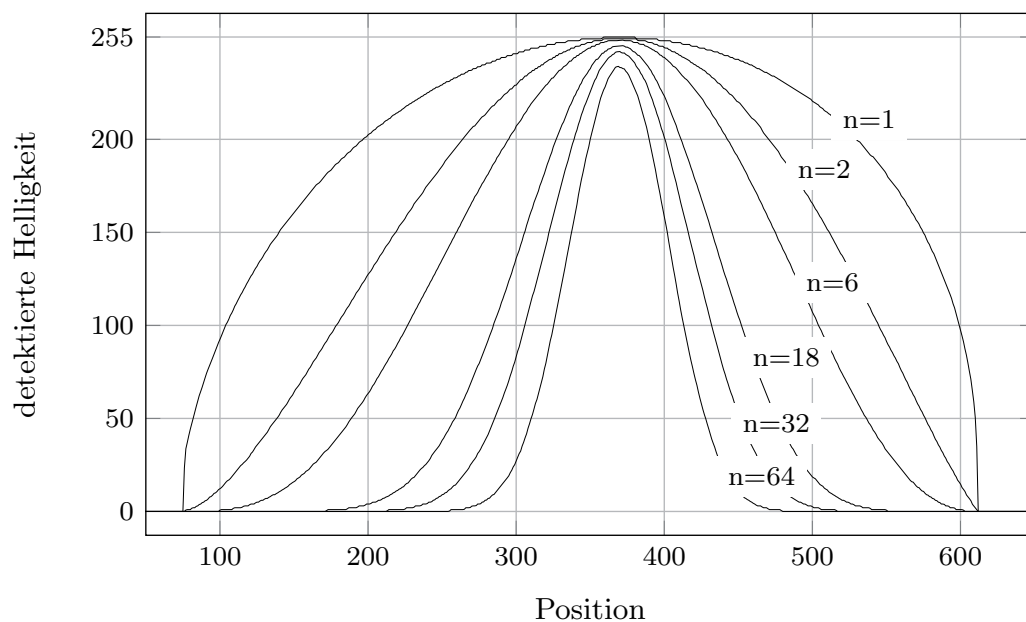


Abb. A.4: Einfluss des Glanzfaktors am Beispiel der oben dargestellten Kugel.

A.3 Bestimmung der Kamera und Projektorposition

In Tabelle A.1 sind alle einzelnen Kamerapositionen und Orientierungen der linken Kamera im oberen Drehkreis während der Einzelaufnahmen der Testszene dargestellt. Gemäß Gleichung (5.3) lassen sich alle Werte in das Scannerbezugssystem $[]^S$ transformieren. Weiter erfolgt die Bestimmung der Kamerapositionen des Modells durch Mittelwertbildung (5.4).

Das ergibt beispielsweise für diese Kamera folgende Parameter:

$$\begin{aligned} \mathbf{cp}_{C1}^S(Oben) &= [101, 3; -138, 6; 330, 0]^T \text{ mm} \\ \omega_{C1}^S(Oben) &= -61,8^\circ \\ \varphi_{C1}^S(Oben) &= -39,6^\circ \\ \kappa_{C1}^S(Oben) &= 35,1^\circ \end{aligned} \tag{A.5}$$

Im Folgenden sind die gemessenen Werte der Kameras sowohl im oberen, als auch im unteren Drehkreis tabellarisch dargestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der gewählten Kamerapositionen und Orientierungen.

Tab. A.1: Kamera 1 - Oben

i	α_i	Bezugssystem $[]^E$						Bezugssystem $[]^S$			
		Position $[mm]$			Orientierung $[^\circ]$			$\kappa_{i,C1}^S$	Position $[mm]$		
		$\mathbf{cp}_i^E.x$	$\mathbf{cp}_i^E.y$	$\mathbf{cp}_i^E.z$	κ_i	ω_i	φ_i		$\mathbf{cp}_i^S.x$	$\mathbf{cp}_i^S.y$	$\mathbf{cp}_i^S.z$
1	-146	0,0	171,7	330,0	178,9	-61,8	-39,6	32,9	96,0	-142,4	330,0
2	-114	87,3	147,8	330,0	148,3	-61,8	-39,6	34,3	99,5	-139,9	330,0
3	-81	153,5	77,0	330,0	115,6	-61,8	-39,6	34,6	100,1	-139,5	330,0
4	-49	171,0	-15,3	330,0	83,8	-61,8	-39,6	34,8	100,6	-139,1	330,0
5	-16	135,5	-105,4	330,0	51,1	-61,8	-39,6	35,1	101,2	-138,7	330,0
6	16	59,7	-161,0	330,0	19,3	-61,8	-39,6	35,3	101,8	-138,3	330,0
7	49	-36,7	-167,7	330,0	-13,4	-61,8	-39,6	35,6	102,5	-137,8	330,0
8	81	-119,5	-123,3	330,0	-45,2	-61,8	-39,6	35,8	103,1	-137,3	330,0
9	114	-167,1	-39,3	330,0	-77,8	-61,8	-39,6	36,2	103,9	-136,7	330,0
10	146	-162,9	54,3	330,0	-109,5	-61,8	-39,6	36,5	104,7	-136,1	330,0

Tab. A.2: Kamera 2 - Oben

i	α_i	Bezugssystem $[]^E$						Bezugssystem $[]^S$			
		Position $[mm]$			Orientierung $[^\circ]$			$\kappa_{i,C1}^S$	Position $[mm]$		
		$\mathbf{cp}_i^E.x$	$\mathbf{cp}_i^E.y$	$\mathbf{cp}_i^E.z$	κ_i	ω_i	φ_i		$\mathbf{cp}_i^S.x$	$\mathbf{cp}_i^S.y$	$\mathbf{cp}_i^S.z$
1	-146	-137,0	103,4	329,8	233,0	-60,9	37,1	87,0	171,4	-9,1	329,8
2	-114	-65,4	158,7	329,8	202,4	-60,9	37,1	88,4	171,6	-4,8	329,8
3	-81	30,9	168,8	329,8	169,6	-60,9	37,1	88,6	171,6	-4,1	329,8
4	-49	115,1	127,3	329,8	137,8	-60,9	37,1	88,8	171,6	-3,4	329,8
5	-16	165,7	44,8	329,8	105,1	-60,9	37,1	89,1	171,6	-2,6	329,9
6	16	164,4	-49,2	329,8	73,3	-60,9	37,1	89,3	171,6	-2,0	329,9
7	49	111,7	-130,3	329,8	40,6	-60,9	37,1	89,6	171,6	-1,1	329,8
8	81	26,5	-169,6	329,8	8,9	-60,9	37,1	89,9	171,6	-0,4	329,8
9	114	-69,2	-157,1	329,8	-23,8	-60,9	37,1	90,2	171,7	0,6	329,8
10	146	-141,5	-97,3	329,8	-55,5	-60,9	37,1	90,5	171,7	1,6	329,8

Tab. A.3: Kamera 1 - Unten

i	α_i	Bezugssystem $[]^E$						Bezugssystem $[]^S$			
		Position $[mm]$			Orientierung $[^\circ]$			$\kappa_{i,C1}^S$	Position $[mm]$		
		$\mathbf{cp}_i^E.x$	$\mathbf{cp}_i^E.y$	$\mathbf{cp}_i^E.z$	κ_i	ω_i	φ_i		$\mathbf{cp}_i^S.x$	$\mathbf{cp}_i^S.y$	$\mathbf{cp}_i^S.z$
11	146	-291,6	34,4	221,7	-97,3	-35,5	5,9	48,7	222,5	-191,6	221,7
12	114	-268,3	-119,2	221,7	-66,6	-35,5	5,8	47,4	218,0	-196,7	221,8
13	81	-161,0	-245,5	221,8	-33,8	-35,5	5,8	47,2	217,3	-197,5	221,8
14	49	-7,7	-293,5	221,8	-2,1	-35,5	5,8	46,9	216,5	-198,3	221,8
15	16	152,3	-251,0	221,8	30,7	-35,5	5,8	46,7	215,6	-199,3	221,8
16	-16	261,6	-133,3	221,8	62,4	-35,5	5,8	46,4	214,7	-200,2	221,8
17	-49	292,2	29,1	221,8	95,1	-35,5	5,8	46,1	213,7	-201,4	221,8
18	-82	233,1	178,5	221,8	126,9	-35,5	5,8	44,9	212,7	-202,3	221,8
19	-114	100,0	276,1	221,7	159,5	-35,5	5,8	45,5	211,6	-203,6	221,8
20	-146	-59,7	287,5	221,7	191,2	-35,5	5,8	45,2	210,3	-205,0	221,7

Tab. A.4: Kamera 2 - Unten




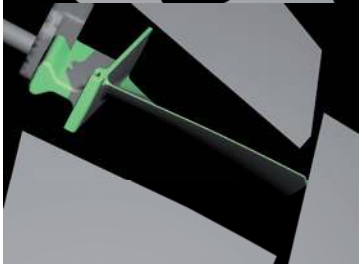
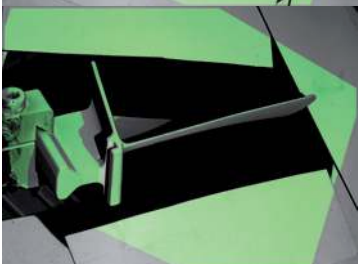
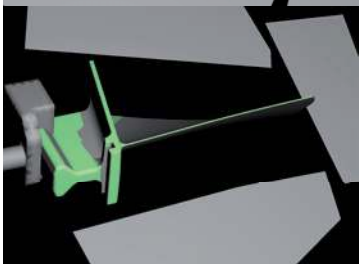
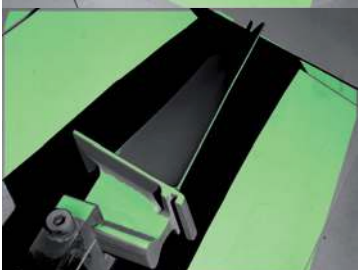
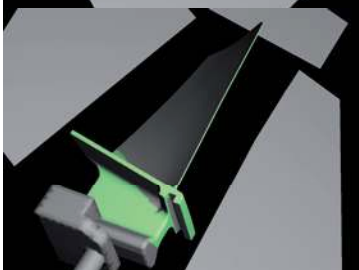
i	α_i	Bezugssystem $[]^E$						Bezugssystem $[]^S$			
		Position $[mm]$			Orientierung $[^\circ]$			$\kappa_{i,C1}^S$	Position $[mm]$		
		$\mathbf{cp}_i^E.x$	$\mathbf{cp}_i^E.y$	$\mathbf{cp}_i^E.z$	κ_i	ω_i	φ_i		$\mathbf{cp}_i^S.x$	$\mathbf{cp}_i^S.y$	$\mathbf{cp}_i^S.z$
11	146	-270,7	-116,9	220,0	-66,2	-34,4	-4,2	79,8	289,8	-54,5	220,0
12	114	-173,1	-238,7	220,1	-35,5	-34,4	-4,2	78,5	288,5	-61,1	220,1
13	81	-16,3	-294,4	220,1	-2,7	-34,4	-4,2	78,3	288,2	-62,1	220,1
14	49	141,1	-258,8	220,1	29,1	-34,4	-4,2	78,1	287,9	-63,3	220,1
15	16	258,7	-141,4	220,1	61,8	-34,4	-4,2	77,8	287,6	-64,6	220,1
16	-16	294,4	16,0	220,1	93,6	-34,4	-4,2	77,6	287,4	-65,8	220,1
17	-49	239,1	172,4	220,1	126,3	-34,4	-4,2	77,3	287,0	-67,4	220,1
18	-82	112,7	272,4	220,1	158,0	-34,4	-4,2	76,0	286,7	-68,7	220,1
19	-114	-52,2	290,2	220,1	190,7	-34,4	-4,2	76,7	286,3	-70,4	220,1
20	-146	-196,6	219,7	220,0	222,3	-34,4	-4,2	76,3	285,9	-72,2	220,1

Tab. A.5: Zusammenfassung aller Kamerapositionen nach der Systemkalibrierung


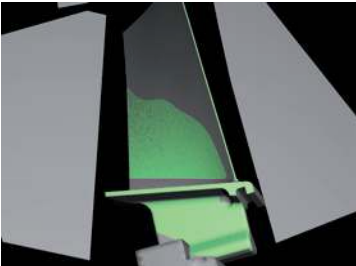

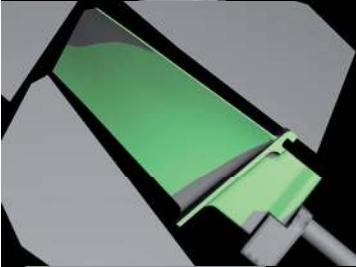

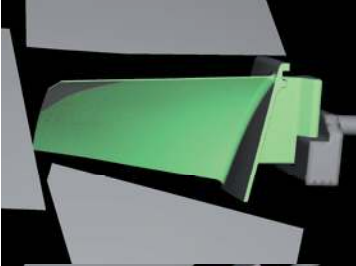
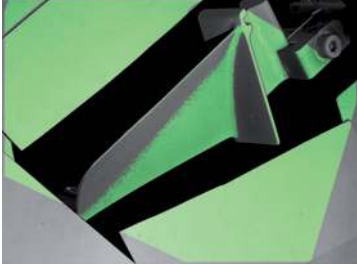
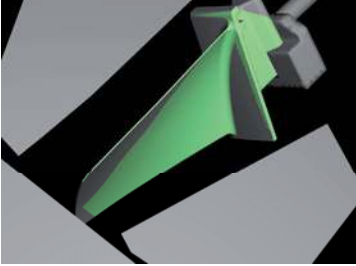
Kamera	$cp_{Cam.x}^S$	PosY	PosZ	rotX	rotY	rotZ
Kamera 1 Oberer Drehkreis	101,3	-138,6	330,0	-61,8	-39,6	35,1
Kamera 2 Oben	171,6	-2,5	329,8	-60,9	37,1	89,1
Kamera 1 Unten	215,3	-199,6	221,8	-35,5	5,8	46,5
Kamera 2 Unten	287,5	-65,0	220,1	-34,4	-4,2	77,6

A.4 Erfassungsergebnisse des Beispielscans

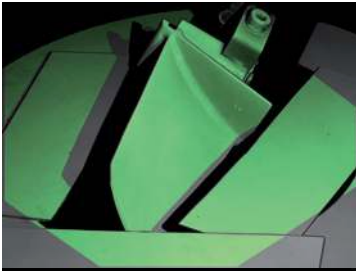
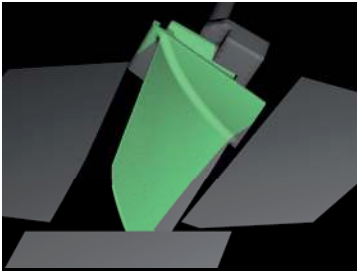
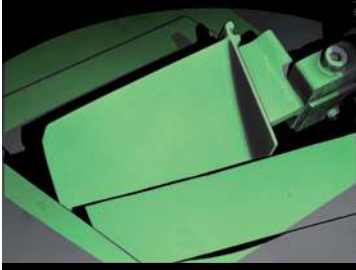
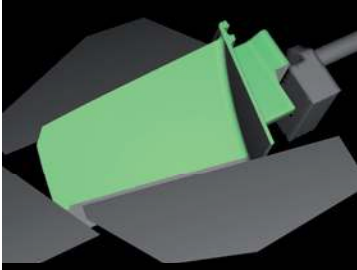
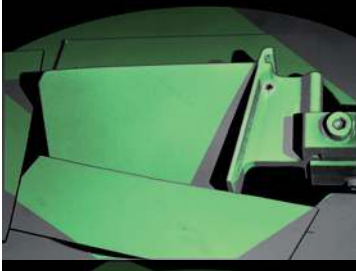
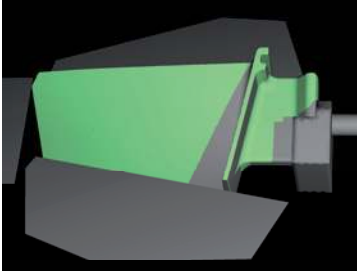

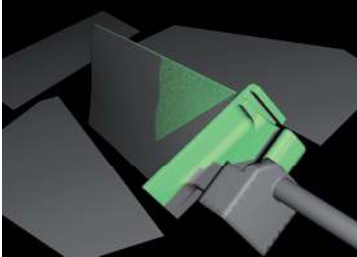
Tab. A.6: Scannergebnisse der Beispielerfassung

Drehkreis- und Winkel	reales Ergebnis	berechnetes Ergebnis
Oben -146°		
Oben -104°		
Oben -63°		
Oben -21°		


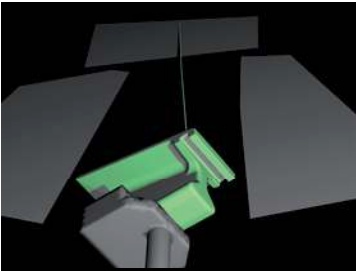

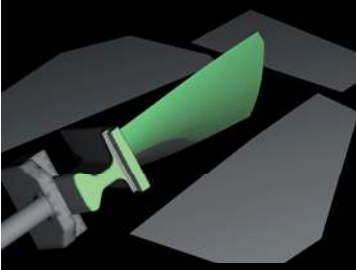
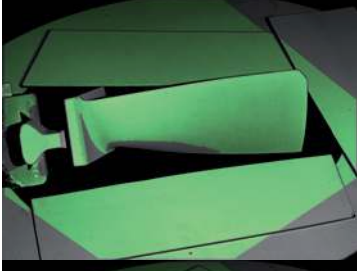
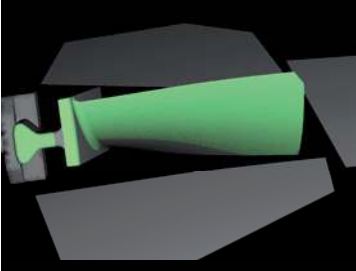

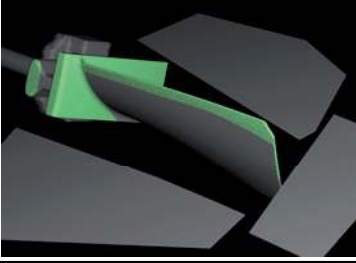
Tab. A.6: Scanergebnisse der Beispielerfassung (*Fortführung*)

Drehkreis- und Winkel	reales Ergebnis	berechnetes Ergebnis
Oben 21°		
Oben 63°		
Oben 104°		
Oben 146°		

Tab. A.6: Scanergebnisse der Beispielerfassung (*Fortführung*)

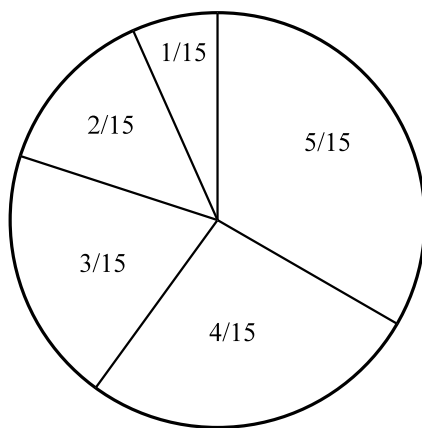
Drehkreis- und Winkel	reales Ergebnis	berechnetes Ergebnis
Unten 146°		
Unten 104°		
Unten 63°		
Unten 21°		

Tab. A.6: Scanergebnisse der Beispielerfassung (*Fortführung*)

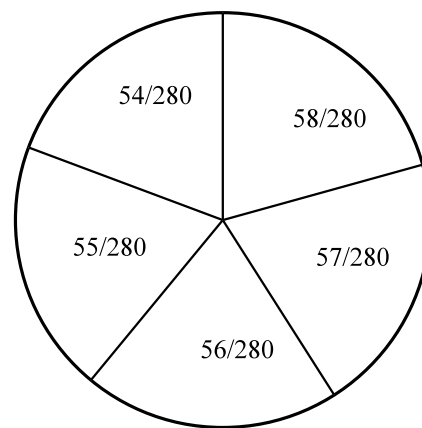
Drehkreis- und Winkel	reales Ergebnis	berechnetes Ergebnis
Unten -21°		
Unten -63°		
Unten -104°		
Unten -146°		

A.5 Vergleich rangbasierter zu fitnessproportionaler Selektion evolutionärer Algorithmen

Abbildung A.5a zeigt für eine Population mit fünf Individuen (Fitness = 58, 57, 56, 55, 54) die entsprechende Selektionswahrscheinlichkeit bezogen auf einen Kreis. Das beste Individuum hat den Rang 1 und somit die Wahrscheinlichkeit von $5/15$. Das schlechteste hat Rang 5 und die Wahrscheinlichkeit $1/15$. Dem gegenüber weist die fitnessproportionale Selektion (auch *Roulette-Wheel* genannt) bei ähnlichen, großen Fitnesswerten etwa gleich große Wahrscheinlichkeiten auf (Abbildung A.5b). Das hat zur Folge, dass kaum Selektionsdruck herrscht und eine Optimierung demnach erheblich gebremst wird.



(a) Rangbasierte Selektion



(b) Roulette-Wheel Selektion

Abb. A.5: Selektionswahrscheinlichkeiten zweier Selektionsverfahren. Die Selektion erfolgt durch zufälliges Würfeln einer Kreisposition, wobei die Trefferwahrscheinlichkeiten den Flächenanteilen der Individuen entsprechen.

A.6 Optimierungsalgorithmen

Nachfolgend sind die Optimierung mit fester Chromosomensatzgröße sowie die Iteration zur Verringerung der Chromosomen pro Individuen dargestellt.

Algorithmus A.1 : Optimierung einer Population mit fester Chromosomensatzgröße mittels Evolutionärer Algorithmen

Eingang : Zu erfassendes Objekt, Zielfunktion, Feste Chromosomensatzgröße n_{gesamt}

Ergebnis : Ein lokales Optimum, welches die Zielfunktion optimal löst

sonstige Parameter : Randbedingungen, Optimierungsparameter

Generiere Startpopulation (Anzahl d Individuen, n_{gesamt} Chromosomen pro Ind.)

Bewerte Startgeneration

Solange Abbruchkriterium nicht erfüllt **bis**

Für jedes Individuum führe aus

Wenn Individuum soll Nachkommen zeugen **dann**

 Nimm vorhergehendes Individuum zum Partner

 Rekombination der Chromosomensätze (Crossover)

 Bewerte Kind

 Füge Kind in Eltern-Population hinzu

Wenn Individuum soll Mutieren **dann**

 Wähle zufällige Chromosomenposition

 Ändere Scannerposition (Mutation)

 Bewerte mutiertes Individuum

 Selektiere Nachkommengeneration

 Sortieren nach dem Besten

return lokales Optimum

Algorithmus A.2 : Iterative Optimierung zur Reduzierung der Erfassungsplanpositionen

Eingang : Zu erfassendes Objekt, Zielfunktion

Ergebnis : Ein lokales Optimum, welches die Zielfunktion optimal löst

sonstige Parameter : Randbedingungen, Referenzerfassungsplan

Bewerte Referenzerfassungsplan

Anzahl der Chromosomen n_{gesamt} der Individuen entspricht dem Erfassungsplan

Solange Optimierung liefert besseres Ergebnis als Referenz **bis**

 Optimiere Population

/* Algorithmus A.1 */

$n_{gesamt} = n_{gesamt} - 2$

return lokales Optimum

A.7 Modellparameter am Beispiel der Verdichterschaufel

Zur Berechnung des Verdichterschaufelbeispiels wurden die Geometrieparameter der oben beschriebenen Kalibrierung genutzt. Die zur Berechnung verwendeten Netzparameter des Scanobjektes, als auch die anzupassenden Parameter für die Beleuchtungsabbildung sind nachfolgend aufgeführt.

Tab. A.7: Verwendete Modellparameter für das Beispiel der Verdichterschaufel

Parameter	Beschreibung
$h^* = 370\text{ mm}$	Mittlerer Abstand vom Kameraprojektionszentrum zur Messfeldmitte
$o = 140\text{ mm}$	Abgebildeter Ausschnitt in Kamerabildbreite bei 1392 Pixel
$M_b = 0.1\frac{\text{mm}}{\text{Pixel}}$	Resultierender Bildmaßstab bei mittlerer Entfernung der Kameras zum Messfeld.
$M_b(60^\circ) = \frac{M_b}{\cos(60)} = 0.2\frac{\text{mm}}{\text{Pixel}}$	Resultierender Bildmaßstab bei einer Flächenankippung von 60° .
$l_k = 0.25\text{ mm}$	Gewählte mittlerer Kantenlänge des verwendeten Dreiecknetzes zur Erfassungsberechnung.
$d\ k_d = 0.48$	Gewählter Anteil diffuser Reflexion.
$s\ k_s = 0.03$	Gewählter Anteil glänzender Reflexion.
$a = 0.028$	Gewählter Anteil umgebender Reflexion.
$n = 9$	Gewählter Glanzfaktor.

A.8 Populationszustände während der Optimierung

Am Beispiel der Optimierung des Standardplanes (16 Erfassungspositionen) sind nachfolgend verschiedene Populationszustände abhängig von der jeweiligen Generation dargestellt. Zu sehen ist, dass mit steigender Generation die Individuen gleichartiger werden. Grund dafür ist, dass sich gute Individuen mit höherer Wahrscheinlichkeit fortpflanzen und somit der Genpool der Population abnimmt.

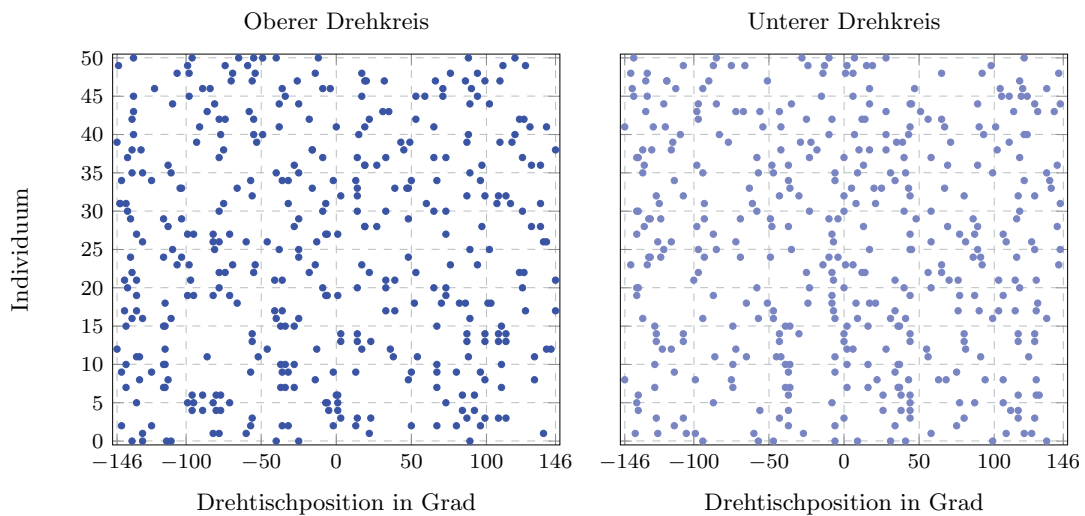


Abb. A.6: Population - Startgeneration. Individuen mit 16 Erfassungsplanpositionen; Die Population ist sehr inhomogen, da es eine Vielzahl verschiedener Individuen gibt

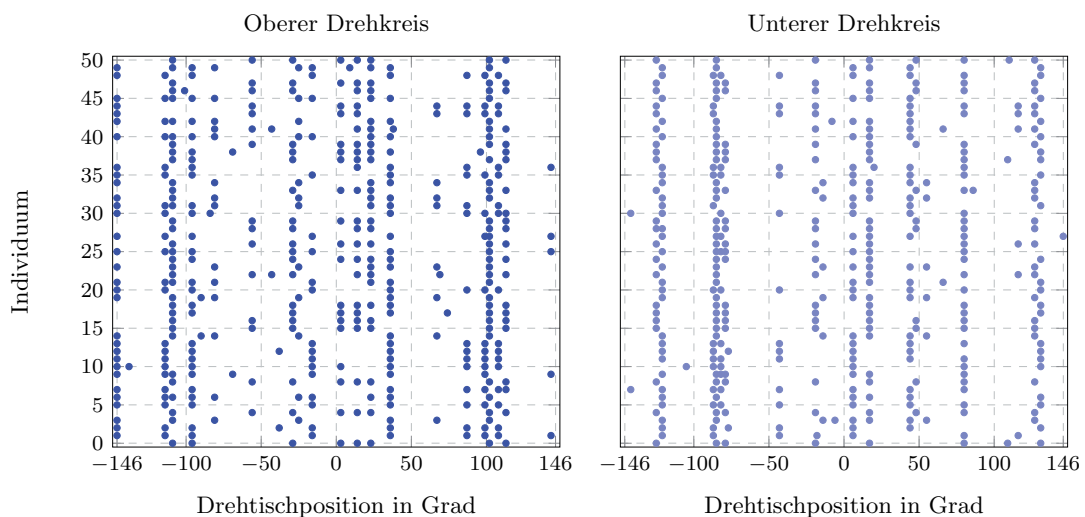


Abb. A.7: Population - 25. Generation; Individuen mit 16 Erfassungsplanpositionen

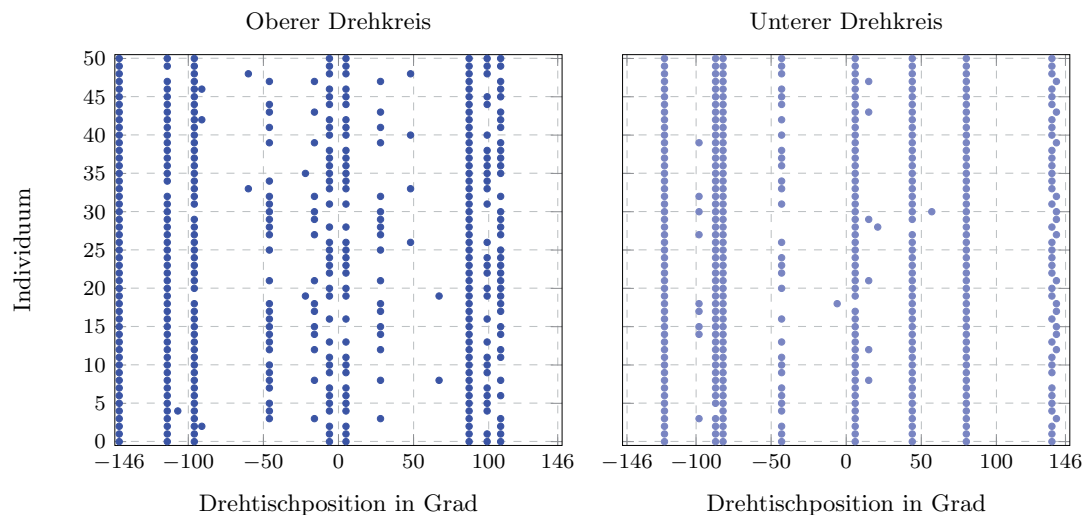
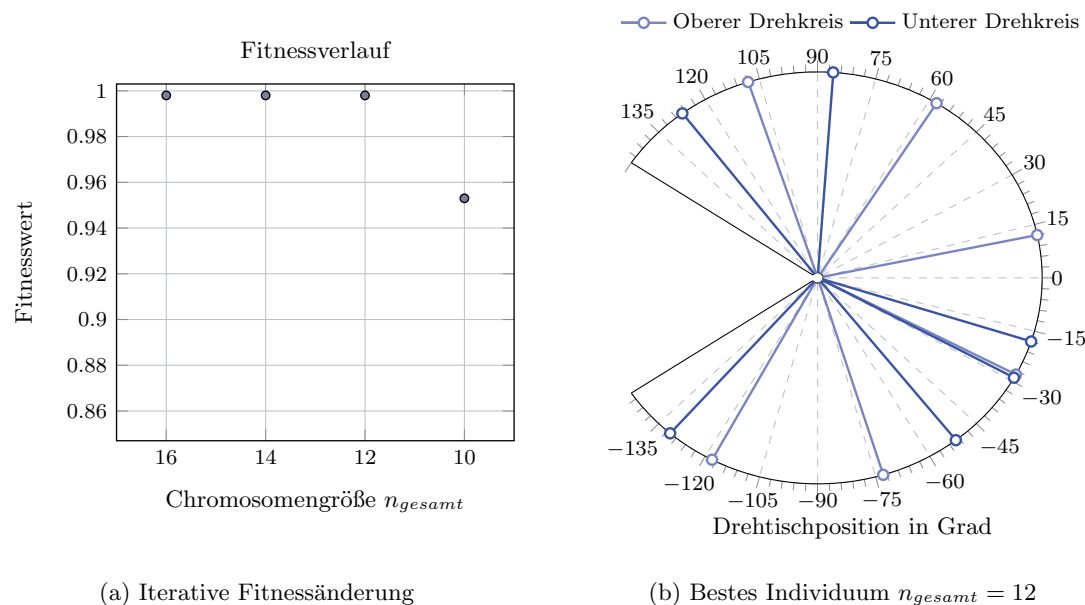


Abb. A.8: Population - 50. Generation; Individuen mit 16 Erfassungsplanpositionen; Optimierungsabbruch; Die Population ist sehr homogen, d. h. es treten viele gleichartige Individuen auf

A.9 Optimierungsbeispiel Halbritzel

Im Folgenden sind die iterative Fitnessänderung A.9a für die Optimierung des Halbritzels, sowie ein optimierter Erfassungsplan A.9b dargestellt. Zu sehen ist, dass bei Chromosomenzahlen ≥ 12 die entsprechende Fläche vollständig erfasst wird. Bei nur 5 Aufnahmen pro Drehkreis wird das Soll nicht mehr erreicht.



(a) Iterative Fitnessänderung

(b) Bestes Individuum $n_{gesamt} = 12$

Abb. A.9: Iterative Optimierung der Positionsanzahl